

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

621.1

А 72

П. А. АНТИКАЙН, М. С. АРОНОВИЧ,
А. М. БАКЛАСТОВ

621.1
А72

РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

В первой главе рассмотрены основные типы рекуперативных теплообменных аппаратов и их назначение.

Вторая глава содержит описание материалов, используемых при изготовлении теплообменных аппаратов, в том числе новых коррозионно-устойчивых неметаллических материалов.

В третьей главе изложены современные методы расчета на прочность основных элементов теплообменников, подверженных напряжениям.

В четвертой главе описаны основные технологические операции и методы изготовления деталей и узлов теплообменных аппаратов.

В пятой главе рассмотрены особенности монтажа, испытания на плотность и прочность, наладки, пуска и сдачи в эксплуатацию теплообменных установок.

Шестая глава рассматривает вопросы эксплуатации, ремонта и техники безопасности теплообменных установок.

Книга является пособием для студентов высших учебных заведений по специальности «Промышленная теплоэнергетика». Книга может также служить руководством для инженеров и техников монтажных, эксплуатационных и проектных организаций.

6П2.22 Антикайн Петр Андреевич, Аронович Марк Саввич

А 72 и Бакластов Арсений Михайлович

Рекуперативные теплообменные аппараты. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
230 с. с черт.

6П2.22

Редактор Е. А. Ницкевич

Техн. редактор Г. Е. Лармонов

Сдано в пр-во 15/1 1962 г.

Подписано к печати 5/V 1962 г.

Формат бумаги 70×108¹/₁₆

19,86 п. л.

24,7 уч.-изд. ч.

Т-04756

Тираж 8 000

Цена 1 р. 34 к.

Заказ 202

ПРЕДИСЛОВИЕ

Грандиозные задачи, поставленные семилетним планом, могут быть решены при интенсивном развитии ведущих отраслей народного хозяйства, в том числе энергетики. Промышленная энергетика в современных условиях имеет важное значение, определяемое все возрастающим комбинированием производственных и энергетических процессов. Основным оборудованием в этих процессах служат теплообменные аппараты различного назначения.

В книге приведено описание современных конструкций рекуперативных теплообменных аппаратов, рассмотрены применяемые для них материалы, изложены методы расчета на прочность, а также особенности изготовления, монтажа испытаний и эксплуатации. Эти сведения являются существенным дополнением к учебным пособиям по теплообменным аппаратам. В книге не рассматривается методика теплового и гидравлического расчета теплообменников, так как эти вопросы достаточно освещены в литературе. В книге приведены важные инструктивные и нормативные положения

законодательных органов, а также содержится справочный материал по проектированию и эксплуатации теплообменного оборудования. Авторы старались при изложении материала использовать основные достижения последних лет в области аппаратостроения.

Главы 1, 4, 5 и 6 написаны А. М. Бакластовым, глава 2 — П. А. Антикайном и М. С. Ароновичем, глава 3 — П. А. Антикайном. Параграф 2-28 написан А. М. Бакластовым.

Подпараграфы гл. 4 — Материалы, применяемые для сварки теплообменных аппаратов и Контроль качества сварных соединений теплообменных аппаратов — написаны П. А. Антикайном. Параграф 4-4 Неметаллические теплообменники написан С. М. Круглым.

Авторы выражают благодарность доктору техн. наук, проф. Лебедеву П. Д., кандидатам техн. наук, доцентам Колачу Т. А. и Троянскому Е. А., а также инж. Удыме П. Г. за ценные советы и замечания по рукописи.

О НОВЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТАХ НА ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В Советском Союзе с 1 июля 1962 г. вводится ГОСТ 8550-61 на тепловые единицы и с 1 января 1963 г. ГОСТ 9867-61 «Международная система единиц (СИ)», частями которой являются система МКС для механических единиц и система МКСГ для тепловых единиц.

Основными единицами измерения в системе МКС являются метр (единица длины), килограмм (единица массы) и секунда (единица времени). Дополнительной единицей для тепловых измерений служит градус Кельвина. Все остальные единицы измерения являются производными. Так, например, в системе МКС единицей силы является ньютон, равный силе, сообщающей единице массы — килограмму ускорение в один метр в секунду в квадрате. Тем самым достигается четкое разграничение между единицей массы (кг) и силы (н), имеющими разные наименования. Размеры основных единиц удобны для практических целей.

В настоящее время в теплотехнике широко применяется в механических измерениях так называемая техническая система единиц измерения; а в тепловых измерениях — внесистемная единица — калория и другие основанные на ней единицы измерения. Все изданные в настоящее время справочные и нормативные материалы (например, Термодинамические таблицы воды и водяного пара, Нормы расчета элементов паровых котлов на прочность) составлены с применением этих старых единиц. Некоторое время наряду с новой вводимой системой СИ будут еще применяться старые единицы измерения. Книга написана до введения новых стандартов на единицы измере-

ния. В ней используются техническая система единиц измерения и тепловые единицы на основе калории.

Для перевода основных применяющихся в настоящее время механических и тепловых единиц в систему МКС ниже приводятся соотношения между старыми и новыми единицами.

1. Единица силы — **ньютон**

$$1 \text{ н} = 0,101972 \text{ кг}.$$

2. Единица работы и энергии — **джоуль**

$$1 \text{ дж} = 0,101972 \text{ кг} \cdot \text{м} =$$

$$= 0,27778 \cdot 10^{-6} \text{ квт} \cdot \text{ч} =$$

$$= 0,238846 \cdot 10^{-3} \text{ ккал}.$$

3. Единица мощности — **ватт**

$$1 \text{ вт} = 0,0013596 \text{ л. с.} =$$

$$= 0,101972 \text{ кг} \cdot \text{м/сек} = 0,859845 \text{ ккал/ч}.$$

4. Единица давления (напряжения) — **ньютон на квадратный метр**

$$1 \text{ н/м}^2 = 0,101972 \text{ кг/м}^2 =$$

$$1,01972 \cdot 10^{-5} \text{ кг/см}^2 =$$

$$= 1,01972 \cdot 10^{-7} \text{ кг/мм}^2.$$

5. Единица динамической вязкости — **ньютон — секунда на квадратный метр**

$$1 \text{ н} \cdot \text{сек/м}^2 = 0,101972 \text{ кг} \cdot \text{сек/м}^2 =$$

$$= 0,28326 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{ч/м}^2.$$

6. Единица теплоемкости — **джоуль на килограмм и градус**

$$1 \text{ дж/кг} \cdot \text{град} =$$

$$= 0,238846 \cdot 10^{-3} \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}.$$

7. Единица теплоотдачи и теплопередачи — **ватт на квадратный метр и градус**

$$1 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град} =$$

$$= 0,860 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град} =$$

$$= 0,239 \cdot 10^{-4} \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}.$$

8. Единица теплопроводности — **ватт на метр и градус**

$$1 \text{ вт/м} \cdot \text{град} = 0,860 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град} =$$

$$= 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град} =$$

$$= 0,001 \text{ квт/м} \cdot \text{град}.$$

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3	2-18. Чугун	47
Глава первая. Типовые конструкции и назначение поверхностных теплообменных аппаратов	7	2-19. Маркировка серого чугуна, основное назначение и область применения	50
1-1. Классификация теплообменных аппаратов	7	2-20. Высокопрочный чугун	51
1-2. Аппараты с рубашечной поверхностью теплообмена	9	2-21. Ковкий чугун	51
1-3. Змеевиковые теплообменники	11	2-22. Легированный чугун	52
1-4. Кожухотрубные теплообменники	12	2-23. Дефекты чугунных отливок и способы их устранения	53
1-5. Ребристые, пластинчатые, спиральные и другие специальные теплообменники	14	2-24. Рост чугуна	53
Глава вторая. Материалы теплообменных аппаратов	18	2-25. Отливки и прокат из цветных металлов и сплавов	53
2-1. Свойства углеродистых сталей	18	2-26. Особенности эксплуатации латунных деталей	56
2-2. Классификация углеродистых сталей	19	2-27. Припои и паяльные сплавы	57
2-3. Стандарты на углеродистую сталь	20	2-28. Неметаллические материалы теплообменных аппаратов	57
2-4. Стальные листы	24	2-29. Коррозия металлов	65
2-5. Стальные трубы	25	2-30. Химическая коррозия и способы защиты от нее	66
2-6. Стальные фасонные отливки	28	2-31. Электрохимическая коррозия и способы защиты от нее	71
2-7. Поковки и штамповки	29	2-32. Коррозия химической аппаратуры	76
2-8. Крепежные детали	30	2-33. Некоторые способы защиты от коррозии	81
2-9. Легированные стали	30	Глава третья. Расчет теплообменных аппаратов на прочность	82
2-10. Влияние температуры на механические свойства стали	33	3-1. Расчет по предельным напряжениям и нагрузкам	82
2-11. Ползучесть и длительная прочность	35	3-2. Выбор коэффициента запаса прочности и допускаемых напряжений	84
2-12. Релаксация	39	3-3. Расчет тонкостенных цилиндрических сосудов на прочность	88
2-13. Изменение структуры и свойств стали в эксплуатации при высоких температурах под напряжением	40	3-4. Расчет толстостенных цилиндрических сосудов на прочность	91
2-14. Тепловая усталость	42	3-5. Учет ослабления стенок сосудов отверстиями	92
2-15. Остаточные напряжения	43	3-6. Укрепление отверстий в цилиндрических сосудах	94
2-16. Влияние минусовых температур на механические свойства металлов	44	3-7. Учет напряжений от изгиба при расчете на прочность	98
2-17. Влияние облучения в реакторах на механические свойства металлов	45		

3-8. Расчет на прочность сварных цилиндрических сосудов	99
3-9. Сосуды, подверженные наружному давлению	100
3-10. Расчет на прочность выпуклых днищ	102
3-11. Расчет на прочность конических днищ и переходов	106
3-12. Расчет плоских донышек, заглушек и крышек	108
3-13. Расчет фланцевых соединений	110
3-14. Расчет на прочность труб и корпусов теплообменных аппаратов жесткой конструкции	113
3-15. Расчет трубных досок	115
3-16. Расчет трубных досок и плоских стенок, укрепленных анкерными связями	117
3-17. Расчет анкерных связей	118
3-18. Прочность гнбов труб	119
3-19. Расчет трубопроводов на самокомпенсацию	120
3-20. Примеры расчета на прочность теплообменных аппаратов	124
Глава четвертая. Изготовление теплообменных аппаратов	129
4-1. Общие положения	129
4-2. Чугунные теплообменники	130
4-3. Стальные теплообменники	131
4-4. Углеродистые теплообменники	163
4-5. Уплотнение фланцевых и сальниковых соединений	168

Глава пятая. Монтаж, испытание и приемка в эксплуатацию теплообменных аппаратов	172
5-1. Сборка теплообменников	172
5-2. Монтаж теплообменной аппаратуры	175
5-3. Испытание теплообменных аппаратов на прочность и плотность	178
5-4. Трубопроводы теплообменных установок, подведомственные Инспекции Госгортехнадзора	182
5-5. Арматура и контрольно-измерительные приборы теплообменных установок	185
5-6. Тепловая изоляция теплообменных установок	187
5-7. Регистрация и освидетельствование аппаратов и сосудов. Приемка в эксплуатацию теплообменных установок	197
Глава шестая. Эксплуатация, ремонт и техника безопасности теплообменных установок	199
6-1. Эксплуатация теплообменных установок	199
6-2. Особенности эксплуатации некоторых теплообменных установок	204
6-3. Ремонт теплообменных установок	218
6-4. Техника безопасности и ее организация	224
Приложение. Основные материалы, используемые для изготовления теплообменных аппаратов, и области их применения	227
Литература	231

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ И НАЗНАЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

1-1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Теплообменные аппараты (теплообменники) представляют собой устройства, предназначенные для передачи тепла от одной рабочей среды (теплоносителя) к другой. Теплоносители могут быть газообразными, жидкими и твердыми. Теплообменники имеют различные назначения: в них могут протекать процессы нагревания, охлаждения, кипения, конденсации, расплавления, затвердевания, а также сложные термохимические процессы — выпаривание, ректификация, полимеризация, вулканизация и многие другие.

По характеру обмена теплом теплообменные аппараты разделяются на поверхностные и смешительные.

В поверхностных аппаратах имеется поверхность нагрева, через которую тепло передается от одного теплоносителя к другому. Если теплообмен между различными теплоносителями происходит через разделительные стенки и тепловой поток в них имеет всегда одно направление, теплообменник называется рекуперативным. Аппараты с переменным по направлению теплообменом между чередующимися теплоносителями, один из которых отдает тепло поверхности, а другой воспринимает это тепло, называются регенеративными.

В смешительных аппаратах теплообмен осуществляется путем непосредственного контакта и смешения теплоносителей: при этом тепло-

обмен происходит одновременно с массообменом, т. е. с изменением теплосодержания среды изменяется и ее массосодержание.

История развития теплообменных аппаратов имеет большую давность и берет начало от варочных котлов с огневым или газовым обогревом. Источником тепла в таких аппаратах служат различные виды топлива, а температура нагрева среды ограничивается технологическим процессом или теплостойкостью материалов. Недостатки таких аппаратов: малый коэффициент теплопередачи, неравномерность обогрева, низкий к. п. д. (20—40%), трудность регулирования процесса. Усовершенствование установки с огневым обогревом (масляные бани, аппараты с механическими мешалками, устройства для регулирования температуры газов) применяются и в настоящее время (рис. 1-1,а).

В дальнейшем огневой и газовой обогревы были заменены паровым, осуществляемым в виде паровой рубашки (рис. 1-1,б). При этом к. п. д. теплообменника составляет 90—95%, а с учетом к. п. д. котельной 50—60%. Теплообменники с наружным паровым обогревом громоздки и отличаются слабой интенсивностью теплообмена. Поэтому их применяют только для специальных целей, преимущественно в химической промышленности.

Более интенсивный теплообмен достигается в тех случаях, когда тепло сообщается нагреваемой жидкости через змеевик, расположенный в теплообменнике (рис. 1-1,в). Удалять из змеевика накипь и загрязнения трудно, поэтому в современных аппаратах поверхность нагрева чаще выполняют из прямых гладких труб, укрепленных в трубных решетках (рис. 1-1,д). Такие аппараты называются кожухотрубными.

В тех случаях, когда расход теплоносителей невелик и по величине близок, можно применить компактный, простой и дешевый теплообменный аппарат «труба в трубе» (рис. 1-1,е), относящийся к типу секционных теплообменников.

Для случаев теплообмена между газами, у которых коэффициент теплоотдачи очень ни-

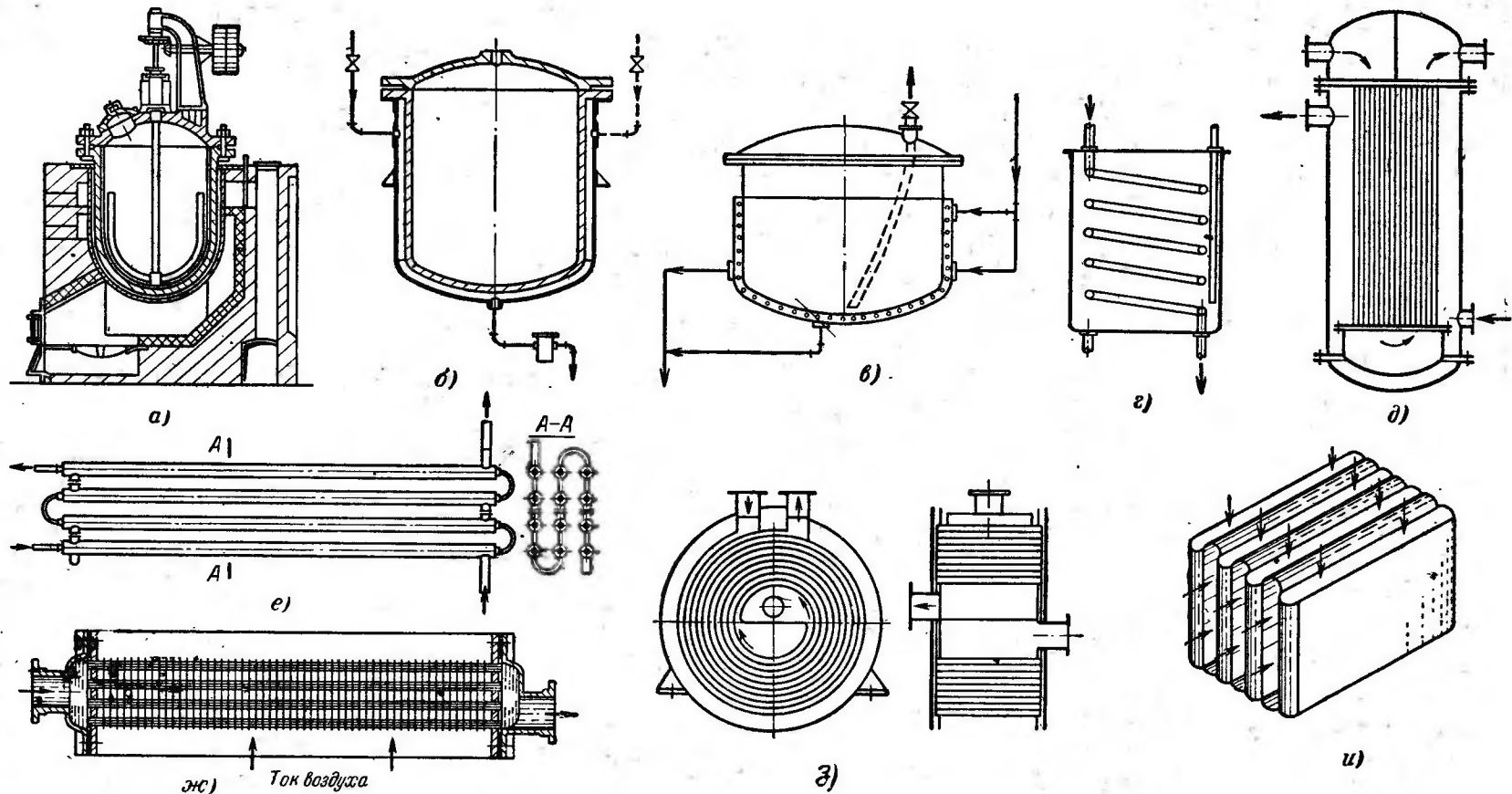


Рис. 1-1. Поверхностные теплообменники.

а — варочный котел с масляной ванной и огнем обогревом; б — автоклав с паровой рубашкой; в — аппарат с залитыми в стенки змеевиками; г — змеевиковый теплообменник; д — кожухотрубный теплообменник с плавающей камерой; е — секционный теплообменник "труба в трубе"; ж — ребристый теплообменник; з — спиральный теплообменник; и — пластинчатый теплообменник.

зок, и водой или водяным паром, у которых этот коэффициент больше в десятки и сотни раз, получили распространение ребристые теплообменники (рис. 1-1,а). Ребра увеличивают поверхность теплообмена со стороны теплоносителя, имеющего меньший коэффициент теплоотдачи, способствуя повышению количества тепла, передаваемого 1 пог. м трубы.

Благодаря компактности и высокому коэффициенту теплоотдачи в последние годы получили распространение спиральные теплообменники, у которых поверхность теплообмена образуется двумя металлическими листами, сворачиваемыми в спирали. Между листами оставляют постоянные зазоры, служащие каналами для протекания теплоносителя. Недостатком таких теплообменников является небольшое давление, допускаемое внутри аппарата (рис. 1-1,б).

Трубчатые теплообменные аппараты для воздуха и газов имеют малую удельную поверхность нагрева, составляющую 40—60 м²/м³ объема аппарата. Значительно большую удельную поверхность нагрева имеют пластинчатые газо- и воздухоподогреватели 200—300 м²/м³. Пластины этих аппаратов изготовляют штамповкой, сваривают попарно и соединяют в секции. Пластинчатые теплообменники просты по конструкции и относительно недороги. На рис. 1-1,в представлена схема работы пластинчатого теплообменника.

1-2. АППАРАТЫ С РУБАШЕЧНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА

Теплообменные аппараты с рубашечным обогревом получили широкое распространение в химической промышленности. Особенно часто рубашки устраивают у тех реакционных аппаратов, в которых установка змеевика внутри сосуда невозможна (например, у аппаратов со скребущей мешалкой).

Устройство аппарата с паровой рубашкой показано на рис. 1-2. Цилиндрический корпус аппарата 1 помещается в кожух-рубашку 2 таким образом, что между внутренней поверхностью кожуха и наружной поверхностью корпуса аппарата образуется герметически замкнутое пространство, в которое при нагреве сверху через штуцер 8 вводится греющий теплоноситель (обычно пар), а снизу через штуцер 9 отводится (при паровом обогреве — конденсат). При охлаждении среда поступает снизу через штуцер 9 и отводится сверху через штуцер 8. Корпус закрывается крышкой 3, на которой имеются штуцера, люки для продукта, привод к мешалке 4 и люк 10 для осмотра аппарата.

В аппаратах такого типа технологический процесс осуществляется под давлением (автоклавы) или разрежением (вакуум-аппараты). Имеются также аппараты, в которых процесс протекает при атмосферном давлении.

Аппараты с рубашками выполняют с мешалками и без них. Если смесь неоднородна или нуждается в равномерном и быстром прогреве, процесс ведется при непрерывном перемешивании. Вал проходит через сальник в крышке аппарата. Опору мешалки располагают так, чтобы можно было осмотреть сальник и сменить набивку.

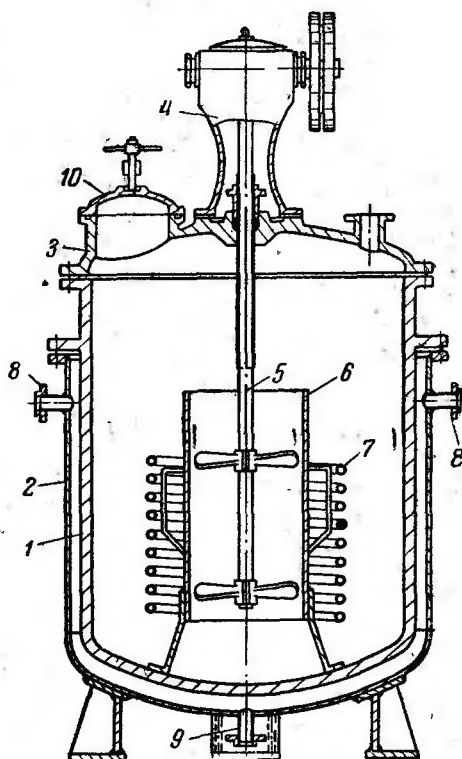


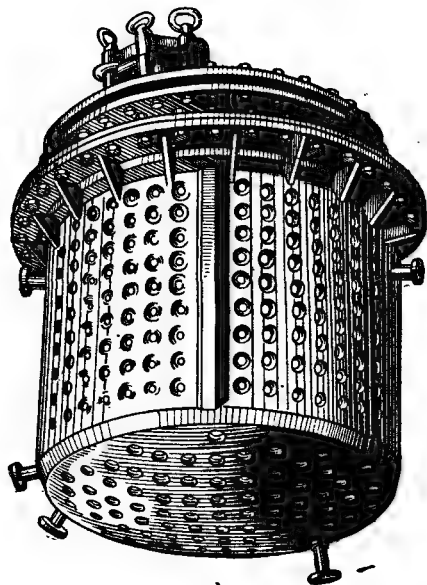
Рис. 1-2. Чугунный реакционный теплообменник со стальной паровой рубашкой.

1—корпус аппарата; 2—рубашка; 3—крышка; 4—привод; 5—вал с мешалкой; 6—стакан; 7—змеевик; 8—штуцер; 9—штуцер; 10—люк.

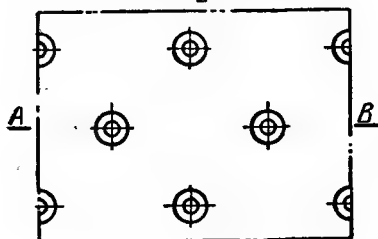
Рубашечные аппараты могут обогреваться паром и жидкостями, а при масляной ванне также огнем или дымовыми газами. Рубашки могут быть использованы для охлаждения аппаратов водой или холодильным рассолом, что облегчает ведение процессов с экзотермическими реакциями. При диаметре аппарата с паровым обогревом более 1 м для полного использования поверхности нагрева пар в рубашку выпускают с двух сторон.

Вертикальное расположение греющей стенки в рубашечных аппаратах способствует стеканию конденсата, что улучшает теплопередачу по сравнению со змеевиковыми аппаратами. Однако в рубашечных аппаратах не может быть достигнута такая высокая удельная поверхность нагрева, как в змеевиковых или кожухотрубных аппаратах. Кроме того, из-за большого диаметра кожуха рубашки нельзя использовать для обогрева пар высокого давления.

Аппараты с рубашками могут быть выполнены из чугуна, стали или специальных сплавов, кожух рубашки выполняют обычно сварным из листовой стали. Иногда по условиям технологического процесса применяют покрытие поверхности аппарата эмалью или другими химически стойкими материалами. Для сохранения внутренней поверхности от разбедания в аппарат вставляют иногда вкладыш; зазор между корпусом и вкладышем заливают сплавами из свинца или олова. Вкладыш из тон-



а)



б)

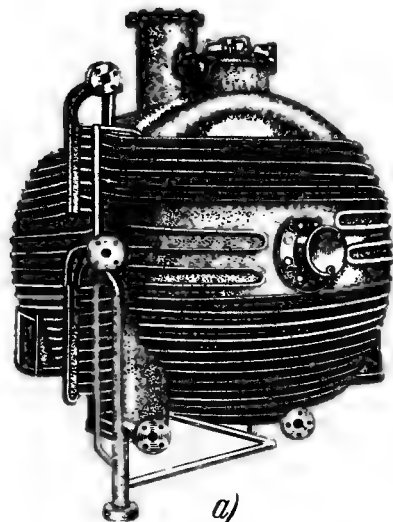
Рис. 1-3. Теплообменник с паровой рубашкой для обогрева паром высокого давления.

а—общий вид; б—крепление рубашки аппарата; 1—рубашка; 2—стенка аппарата.

кого и стойкого материала можно заменить новым, что дешевле замены всего аппарата.

Аппараты с обыкновенными паровыми рубашками применяют для обогрева паром давлением не более 5 атм. В последнее время начали применять аппараты с рубашками, пригодными для работы при высоких давлениях, изготовленными из листов с выштампованными отверстиями (рис. 1-3). Кромки листов по периметру отверстий приваривают к стенке аппарата. Рубашки такой конструкции отличаются высокой прочностью и допускают давление греющего пара до 75 атм. В рубашке такой конструкции теплообменка более интенсивна, чем в рубашках обычной конструкции, что обусловлено повышенной скоростью теплоносителя в связи с уменьшением свободного сечения для его протекания.

Для повышения давления греющего теплоносителя было предложено заливать поверхность теплообмена, выполненную в виде змее-



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1-4. Теплообменник с поверхностью нагрева в виде труб, приваренных к наружной стенке аппарата.

а—общий вид; б—приварка труб к стенке аппарата; в—крепление труб сваркой через медные прокладки; г—поверхность нагрева из уголков; д—поверхность нагрева из половинок труб.

виков, в чугунные стенки теплообменного аппарата (рис. 1-1,а). Однако заливка змеевика сложна: кроме того, чугун должен иметь одинаковый с материалом змеевика коэффициент теплового расширения, иначе аппарат быстро разрушится. Высокий брак при отливке и большой вес аппаратов такой конструкции удорожают и тем самым ограничивают область их применения.

Более совершенны аппараты для нагревания теплоносителями высоких давлений (до 250 атм), в которых стальной змеевик приваривается к наружной поверхности корпуса аппарата (рис. 1-4,а, б). Если материал корпуса не может быть сварен непосредственно со стальными змеевиками, применяют способ, представленный на рис. 1-4,в: на предварительно очищенную наружную поверхность стенки корпуса укладывают плотную медные прокладки, на которых располагают трубки змеевика, соединяемые между собой сваркой. Для прочности трубки скрепляют металлическими полосами, расположенными перпендикулярно к плоскости витков. Иногда к стенкам корпуса аппарата приваривают стальные угольники (рис. 1-4,г) или половинки труб, разрезанных вдоль оси (рис. 1-4,д). Аппараты такой конструкции применяют при давлении до 60 атм, однако они значительно проще в изготовлении и обеспечивают лучшую теплопередачу, чем аппараты с приваренными змеевиками.

1-3. ЗМЕЕВИКОВЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Одним из простейших теплообменников является змеевиковый аппарат, представляющий собой сосуд со спиральной трубой, витки которой располагаются по винтовой линии. По змеевику движется теплоноситель или охлаждающая жидкость (рис. 1-5, а).

При паровом обогреве пар вводится обычно в змеевики сверху, чтобы конденсат мог свободно стекать.

При большой общей поверхности теплообмена, для того чтобы в трубках не скапливался конденсат, змеевики по длине разделяют на несколько секций.

При охлаждении охлаждающую жидкость вводят в змеевик снизу при скорости до $1,5-2$ м/сек.

При паровом обогреве скорость пара при входе в змеевики принимают до 50 м/сек.

Поверхности теплообмена в змеевиковых аппаратах выполняют из стальных, медных, латунных, алюминиевых или свинцовых труб, а также из кислотоупорных материалов — стекла, керамики или пластмасс.

Змеевиковые поверхности теплообмена выполняют из труб внутренним диаметром не более 65 мм. Во избежание прогиба и деформации труб большого диаметра с большим числом витков каждый виток укрепляют при помощи болтов на стойках из стального проката (рис. 1-5, в).

Условия теплоотдачи на внутренней поверхности труб змеевиковых аппаратов обычно удовлетворительны. Однако теплоотдача на наружной поверхности труб большей частью низка вследствие малых скоростей среды. Поэтому змеевиковые теплообменники обычно применяют в аппаратах небольшой емкости.

Калужский турбинный завод выпустил «винтовые» теплообменники (рис. 1-6) для использования в качестве регенеративных подогревателей низкого и высокого давлений и

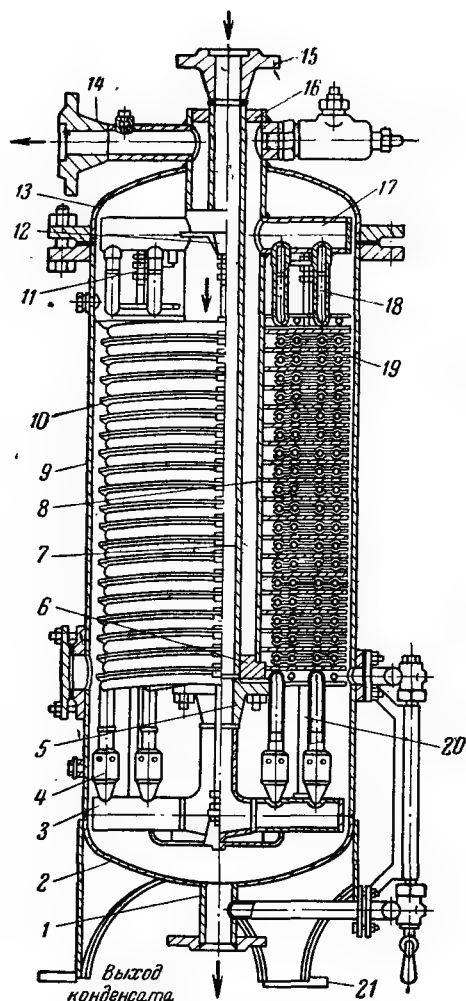
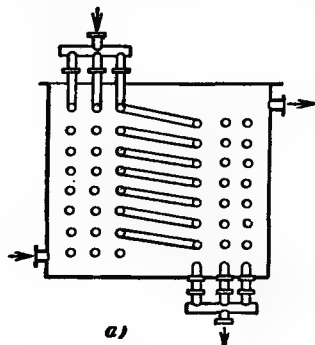
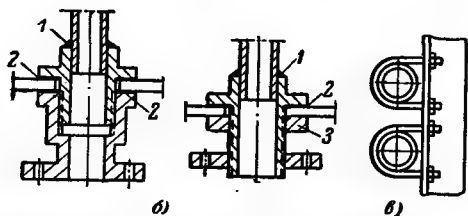


Рис. 1-6. Винтовой подогреватель.

1—патрубок для отвода конденсата; 2—днище; 3—нижние коллекторы; 4—напильные соединения; 5—фланец; 6—доннышко; 7 и 8—концентрические трубы; 9—корпус; 10—разборные винтовые перегородки; 11—анкерные тяги; 12—опоры; 13—крышка; 14—патрубок для выхода воды; 15—патрубок для входа воды; 16—доннышко; 17—верхние коллекторы; 18—дистанционные трубки; 19—хомуты для крепления змеевиков; 20—дистанционные трубки; 21—опорные лапы.



а)



б)

Рис. 1-5. Змеевиковый теплообменник.

а—схема теплообменника; б—ввод змеевика; в—крепление; 1—сварка; 2—прокладка; 3—гайка.

холодильников эжекторов к турбинам мощностью до 6000 квт. В этих аппаратах нагреваемая вода поднимается по нескольким параллельно включенным концентрически установленным змеевикам, а протекающий пар направляется сверху вниз по спиральному каналу, образованному поперечными по отношению к вертикальной оси аппарата перегородками, вставленными между витками змеевиков. Такая конструкция допускает большие скорости теплоносителей как в змеевиках, так и в межтрубном пространстве, что обеспечивает высокие коэффициенты теплопередачи.

Подогреваемая вода поступает через патрубок 15, опускается по трубе 7 в нижние коллекторы 3 и движется по змеевикам вверх. Из змеевиков вода поступает в верхние коллекторы 17 и по кольцевому сечению между

трубами 7 и 8 выходит в патрубок 14. Греющий пар поступает через патрубок (не видный на чертеже), сваренный в крышку 13, и по спиральным каналам движется сверху вниз.

1-4. КОЖУХОТРУБНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Кожухотрубные теплообменники (рис. 1-7) относятся к наиболее распространенным аппаратам. Их применяют для теплообмена и термохимических процессов между различными жидкостями, парами и газами — как без изменения, так и с изменением их агрегатного состояния.

Теплообменники состоят из пучков труб, укрепленных в трубных досках, кожухов, крышек, камер, патрубков и

опор. Трубное и межтрубное пространства в этих аппаратах разобщены, причем каждое из них может быть разделено перегородками на несколько ходов. Теплопередающая поверхность аппаратов может составлять от нескольких сотен квадратных сантиметров до нескольких тысяч квадратных метров. Так, конденсатор паровой турбины мощностью 150 Мвт состоит из 17 тыс. труб с общей поверхностью теплообмена около 9 000 м².

Схемы кожухотрубных аппаратов наиболее распространенных типов представлены на рис. 1-7. Типовые конструкции кожухотрубных теплообменников разработаны Главхиммашем.

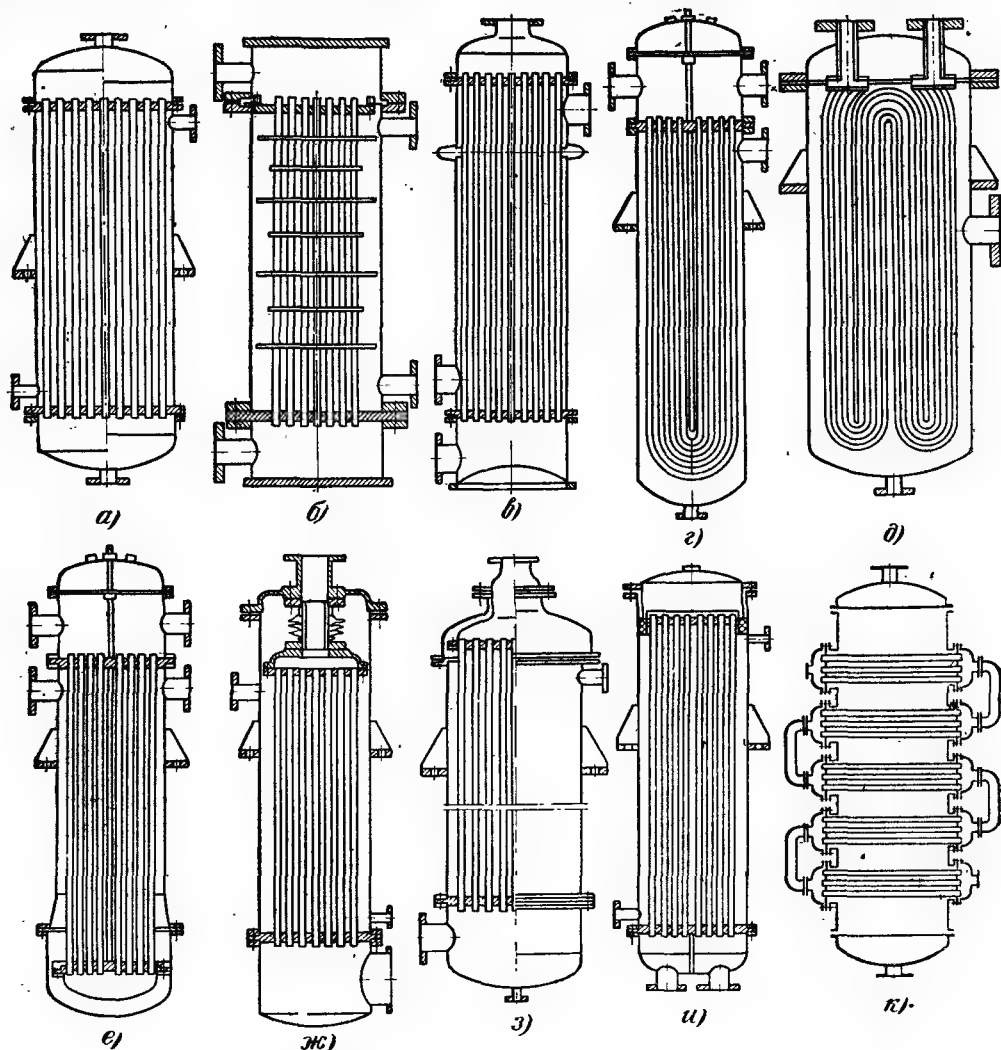


Рис. 1-7. Кожухотрубные теплообменники.

а — с жестким креплением трубных решеток; б — с поперечными перегородками; в — с линзовым компенсатором на корпусе; г — с U-образными трубами; д — с W-образными трубами; е — с плавающей камерой; ж — с сифонным компенсатором по направляющей трубе; з — с сальниковым уплотнением на штуцере; и — с сальником на корпусе; к — с поперечными трубами.

Кожух (корпус) кожухотрубного теплообменника представляет собой трубу, сваренную из одного или нескольких стальных листов. Кожухи различаются главным образом способом соединения с трубной доской и крышками. Толщина стенки кожуха определяется давлением рабочей среды и диаметром кожуха, но принимается не менее 4 мм. К цилиндрическим кромкам кожуха приваривают фланцы для соединения с крышками или днищами (рис. 1-7, г). На наружной поверхности кожуха прикрепляют опоры аппарата.

Трубчатка кожухотрубных теплообменников выполняется из прямых или изогнутых (U-образных или W-образных) труб диаметром от 12 до 57 мм. По нормам Главхиммаша предпочтительны стальные бесшовные трубы по ГОСТ 8731-34-58.

Трубные доски (решетки) служат для закрепления в них пучка труб при помощи развальцовки, разбортки, заварки, запайки или сальниковых креплений. Трубные доски приваривают к кожуху (рис. 1-7а, в), зажимают болтами между фланцами кожуха и крышки (рис. 1-7б, г) или соединяют болтами только с фланцем свободной камеры (рис. 1-7д, е). Материалом досок служит обычно листовая сталь марки Ст. 4 толщиной, зависящей от расчетного давления, но не менее 20 мм.

Кожухотрубные теплообменники могут быть жесткой (рис. 1-7а, к), нежесткой (рис. 1-7г, д, е, з, и) и полужесткой (рис. 1-7б, в, ж) конструкции, одно- и многоходовые, прямо-, противо- и поперечно-точные, горизонтальные, наклонные и вертикальные.

На рис. 1-7а изображен одноходовой теплообменник с прямыми трубками жесткой конструкции. Кожух и трубки связаны трубными решетками и поэтому не имеют возможности компенсировать разность тепловых удлинений. Такие аппараты просты по устройству, но могут применяться только при сравнительно небольших разностях температур между корпусом и пучком труб (до 50°С). Они имеют низкие коэффициенты теплопередачи вследствие незначительной скорости теплоносителя в межтрубном пространстве.

В кожухотрубных теплообменниках проходное сечение межтрубного пространства в 2—3 раза больше проходного сечения трубок. Поэтому при одинаковых расходах теплоносителей, имеющих одинаковое агрегатное

состояние, коэффициенты теплоотдачи на поверхности межтрубного пространства невысокие, что снижает коэффициент теплопередачи в аппарате. Устройство перегородок в межтрубном пространстве способствует увеличению скорости теплоносителя и повышению коэффициента теплопередачи. На рис. 1-7б изображен теплообменник с поперечными перегородками в межтрубном пространстве и полужесткой мембранной компенсирующей тепловых удлинений вследствие некоторой свободы перемещения верхней трубной доски.

В парожидкостных теплообменниках пар проходит обычно в межтрубном пространстве, а жидкость — по трубам. Разность температур стенки корпуса и труб обычно значительна. Для компенсации разности тепловых удлинений между кожухом и трубами устанавливают линзовые (рис. 1-7в), сальниковые (рис. 1-7з, и) или сильфонные (рис. 1-7ж) компенсаторы.

Для устранения напряжений в металле, обусловленных тепловыми удлинениями, изготовляют также однокамерные теплообменники с гнутыми U- и W-образными трубами. Они целесообразны при высоких давлениях теплоносителей, так как изготовление водяных камер и крепление труб в трубных досках в аппаратах высокого давления — операции сложные и дорогие. Однако аппараты с гнутыми трубами не могут получить широкого распространения из-за трудности изготовления труб с разными радиусамигиба, сложности замены труб и неудобства чистки гнутых труб.

Компенсационные устройства сложны в изготовлении (мембранные, сильфонные, с гнутыми трубами) или недостаточно надежны в эксплуатации (линзовые, сальниковые). Более совершенна конструкция теплообменника с жестким креплением одной трубной доски и свободным перемещением второй доски вместе с внутренней крышкой трубной системы (рис. 1-7е). Некоторое удорожание аппарата из-за увеличения диаметра корпуса и изготовления дополнительного днища оправдывается простотой и надежностью в эксплуатации. Эти аппараты получили название теплообменников «с плавающей головкой».

Теплообменники с поперечным током (рис. 1-7к) отличаются повышенным коэффициентом теплоотдачи на наружной поверхности вследствие того, что теплоноситель движется поперек пучка труб. При перекрестном токе снижается разность температур между теплоносителями, однако при достаточном числе трубных секций различие в сравнении с противотоком невелико. В некоторых конструкциях таких теплообменников при протекании газа в межтрубном пространстве и жидкости в трубах для повышения коэффициента теплоотдачи применяют трубы с поперечными ребрами.

Секционные теплообменники, являющиеся разновидностью трубчатых теплообменников, состоят из нескольких последовательно соединенных секций, каждая из которых представляет собой трубчатку с малым числом труб, помещенную в кожух небольшого диаметра. В секционных аппаратах, сравнительно простых по конструкции, даже без внутренних перегородок легко достигаются благоприятные для хорошего теплообмена условия; проточное и равномерное по проходному сечению

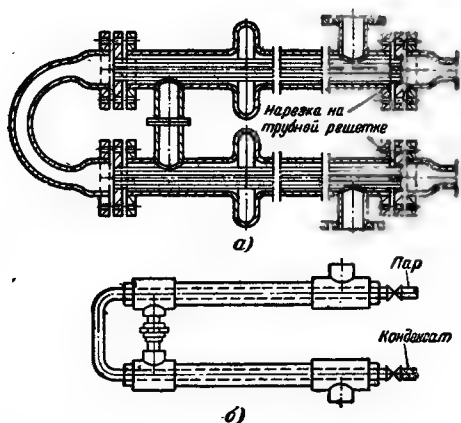


Рис. 1-8. Секционные теплообменники.
а — теплообменник типа Мосэнерго; б — теплообменник „труба в трубе“ из труб и фланцев.

движение теплоносителей, а также достаточно высокие и примерно равные их скорости (для физически однородных сред).

На рис. 1-8,а показаны секционные теплообменники, разработанные Мосэнерго.

Кожух и камеры секционных теплообменников выполняют, как правило, из цельнотянутых стальных труб нормального сортамента. Компенсация температурных удлинений осуществляется сварным в кожухе линзовым компенсатором. Для удаления трубного пучка из кожуха при ремонте задняя трубная доска выполняется составной на газовой резьбе с таким расчетом, чтобы диаметр внутренней ее части был на 2—4 мм меньше внутреннего диаметра кожуха.

Кожухи секционных теплообменников изготовляют из труб длиной до 4 м, внутренним диаметром от 50 до 305 мм. Число труб в секции составляет от 4 до 140, поверхность нагрева — от 0,75 до 26,4 м². Трубы — латунные диаметром 16/14 мм. Отношение поверхности нагрева к объему теплообменника достигает 80 м²/м³, а удельный вес составляет 50—80 кг/м².

При небольших объемах теплоносителей и высоком их давлении целесообразно применение теплообменников «труба в трубе», представляющих собой разновидность секционных аппаратов (рис. 1-8,б). Диаметр внутренней трубы принимают обычно 38—57 мм, наружной 76—108 мм; в случае необходимости теплообменники выполняют из нескольких параллельных секций. Небольшое поперечное сечение позволяет достигать высокие скорости теплоносителей.

К существенным недостаткам секционных теплообменников относятся:

1) громоздкость и высокая стоимость поверхности теплообмена из-за большого числа кожухов, камер, трубных досок, фланцев и других деталей;

2) большая длина пути теплоносителей с многими переходами и поворо-

тами, создающая большое гидравлическое сопротивление и вызывающая значительный расход электроэнергии.

1-5. РЕБРИСТЫЕ, ПЛАСТИНЧАТЫЕ, СПИРАЛЬНЫЕ И ДРУГИЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Ребристые теплообменники

Ребристые поверхности теплообмена применяют с целью увеличения теплопередачи через металлические стенки в тех случаях, когда условия теплопередачи по обеим сторонам стенки значительно различаются. При нагревании, например, воздуха паром условия теплоотдачи по обеим сторонам стенки весьма различны: коэффициент теплоотдачи от греющего пара к стенке составляет 5 000—10 000 ккал/м²·ч·град, в то время как от стенки к нагреваемому воздуху или газу он составляет всего 5—50 ккал/м²·ч·град. Улучшение условий теплопередачи достигается искусственным увеличением теплопередающей поверхности с помощью ребер, размещаемых с той стороны, где величина коэффициента теплоотдачи мала.

Ребристые теплообменники изготовляют разнообразных конструкций (рис. 1-9). Наиболее распространены воздухонагреватели с поперечными круглыми и прямоугольными реб-

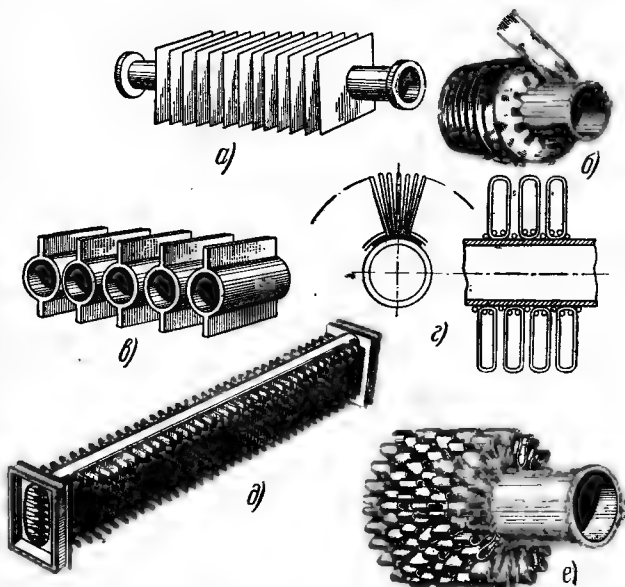


Рис. 1-9. Ребристые теплообменники.

а — труба с оребрением прямоугольными шайбами; б — труба со спиральным оребрением; в — сварное оребрение труб; г — проволоочное (биспиральное) оребрение труб; д — чугунная труба с двусторонним игольчатым оребрением; е — многоребристая труба.

рами (рис. 1-9,а). Иногда ребра выполняют навивкой металлической ленты, поставленной на ребро (рис. 1-9,б). В качестве регенераторов промышленных печей применяют чугунные игольчатые теплообменники с иглами на внешней и внутренней стороне (рис. 1-9,д). При продольном обтекании труб целесообразно располагать ребра вдоль образующих труб (так называемые плавниковые трубы) (рис. 1-9,в).

В последние годы для охлаждения воздуха или газа в замкнутом вентиляционном контуре электрических генераторов нашли применение теплообменники с проволочным «биспиральным» оребрением (рис. 1-9,г). Искусственно созданная шероховатость и одновременно сильно развитая поверхность трубы способствуют повышению теплопередачи в теплообменниках с проволочным оребрением. Многоребристая труба теплообменника для чистых газов и жидкостей показана рис. 1-9,е. Оребрение осуществляется приваркой к гладкой поверхности трубы диаметром 25/23 мм волнистой ленты, образующей ребра с просветом в 10 мм.

Существенное значение для эффективности работы ребристых аппаратов имеет материал труб и ребер, а также контакт между ними. Для повышения теплопроводности часто применяют латунь, алюминий или медь. Хороший контакт между трубами и ребрами достигается лужением или оцинкованием.

Пластинчатые теплообменники

При теплообмене между газами трубчатые аппараты характеризуются низким коэффициентом теплопередачи и малым коэффициентом удельной поверхности нагрева ($40-80 \text{ м}^2/\text{м}^3$). Для таких теплоносителей с близкими по значению коэффициентами теплоотдачи нашли применение пластинчатые теплообменники. Эти аппараты состоят из ряда параллельных пластин, каналы между которыми сгруппированы так, что по одной части каналов движется горячий теплоноситель, а по другой — холодный. Движение может быть противоточным и перекрестным. Пластинчатые теплообменники компактны, их удельная поверхность нагрева велика (до $200-300 \text{ м}^2/\text{м}^3$), но прочность пластин невысока, поэтому они применимы только при малых давлениях.

В последние годы широко изготовленные пластинчатых теплообменников из штампованных гофрированных пластин, изготовляемых из нержавеющей стали толщиной 1,0—1,5 мм. Сохраняя преимущества обычных пластинчатых аппаратов, штампованные пластинчатые тепло-

обменники допускают рабочее давление до 15 атм.

На рис. 1-10 представлен пластинчатый воздухоподогреватель Невского завода имени Ленина. Каналы аппарата образованы штампованными стальными листами: сечение одного из каналов — волнообразное (заштрихован на рис. 1-10,а), другого — перекрестного — овальное. Торцы листов сварены попарно. Пакеты стягивают болтами, которые воспринимают давление теплоносителей (рис. 1-10,б).

Спиральные теплообменники

Спиральные теплообменники предназначены для подогрева или охлаждения жидкостей и газов. Они могут работать как при противотоке, так и при перекрестном токе теплоносителей.

Теплообменник состоит из корпуса, верхней и нижней крышек и опорной рамы (рис. 1-11). Поверхность теплообмена образована металлическими листами, свернутыми по спирали. Образующиеся между спиралями каналы прямоугольного сечения начинаются в центре в форме полуцилиндров и кончаются на периферии специальными коробками со штуцерами. Для придания листам жесткости и для фиксирования расстояния между спиралями по обеим торцовым сторонам к листам приварены бобышки. Торцы корпуса уплотнены и скреплены болтовым соединением с крышками при помощи фланцев, приваренных к наружным виткам спирали.

Спиральные теплообменники — горизонтального типа противоточные; их применяют при теплообмене между двумя жидкостями. Теплообменники вертикального типа применяют для теплообмена между паром и жидкостью; они могут работать при противотоке и перекрестном токе. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду рекомендуется пропускать холодный теплоноситель по наружному каналу.

Спиральные теплообменники получили широкое распространение благодаря ряду преимуществ перед трубчатыми: удельная поверхность на единицу объема в 2 раза больше, чем в трубчатых; малый вес; возможность достижения больших скоростей; высокий коэффициент теплопередачи; небольшие гидравлические сопротивления; малая подверженность загрязне-

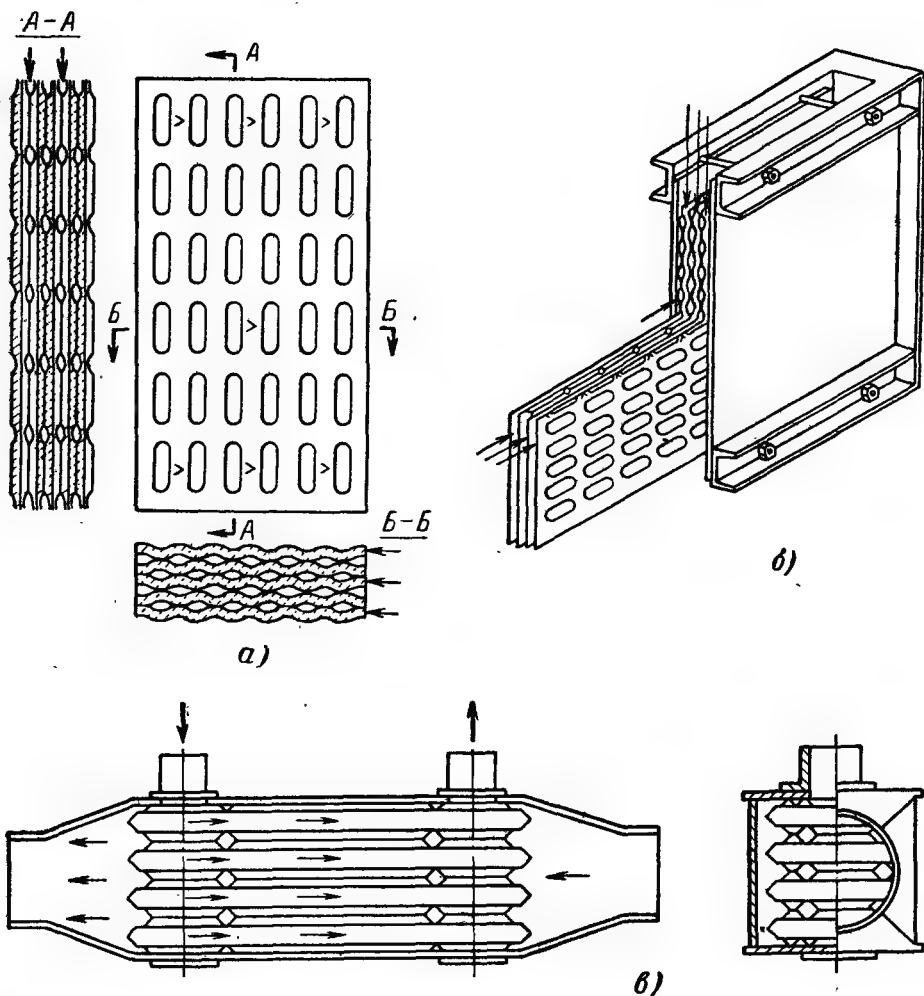


Рис. 1-10. Пластина́тые штампованные теплообменники.
а и б — пластина́тый подогреватель конструкции НЗЛ.

нию. Недостатки: трудность производства ремонтных работ; пригодность для работы при давлении до 6—10 атм.

Спиральные теплообменники сложны в изготовлении, затруднительна герметизация каналов с разными теплоносителями.

Прокатно-сварные теплообменники

Разработка новых технологических процессов обработки металлов, в частности сварки, совмещенной с прокаткой, позволила создать прокатно-сварные теплообменники из алюминиевых сплавов для холодильных установок и других отраслей техники.

Прокатно-сварной теплообменник имеет систему каналов, образованную между двумя листами из алюминиевого сплава, сваренными посредством холодной или горячей прокатки (рис. 1-12). Таким методом можно получить изделия со сложной системой каналов. При

толщине стенок канала в 0,75—1 мм теплообменники выдерживают гидравлическое давление до 16 атм.

Прокатно-сварные теплообменники выгодно отличаются от других поверхностных теплообменных аппаратов невысокой стоимостью, простотой и дешевизной изготовления. Замена алюминием меди и нержавеющей стали делает эти теплообменники особо перспективными.

Шнековые теплообменники

Шнековый теплообменник представляет собой закрытый короб, в котором установлены два полых шнека (рис. 1-13). Обрабатываемый материал поступает через приемный люк в верхней крышке короба и удаляется через нижний люк. При вращении шнеков материал в коробе передвигается и тщательно перемешивается, а соприкасаясь с поверхностью полых шнеков, в которых течет теплоноситель, нагревается или охлаждается.

Через головку на валу шнека теплоноситель поступает в полый вал, проходит по его

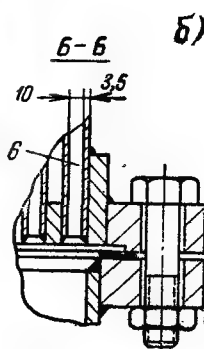
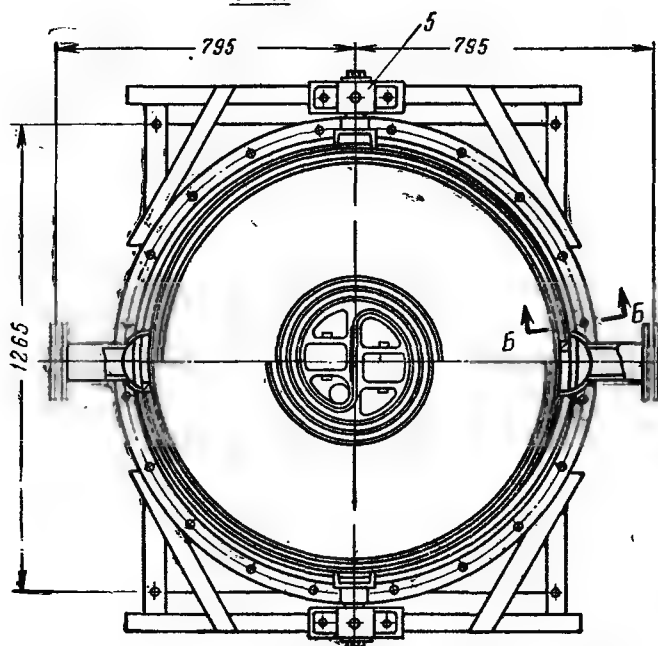
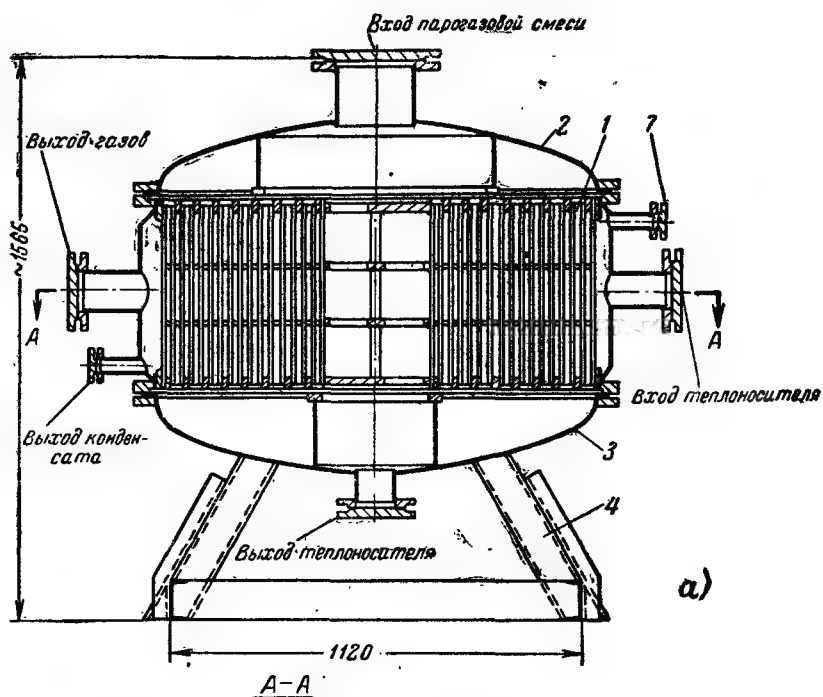


Рис. 1-11. Спиральный теплообменник Сумского завода.

а — теплообменник; б — уплотнение спиралей; 1 — корпус; 2 — верхняя крышка; 3 — нижняя крышка; 4 — опорная рама; 5 — подшипник; 6 — спирали; 7 — воздушник.

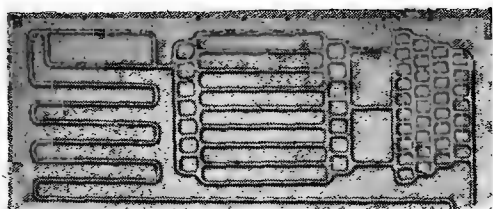


Рис. 1-12. Прокатно-сварной теплообменник.
а—контур канала; б—профиль канала.

длине и поступает в пустотелые витки шнека. Отдав тепло материалу, теплоноситель через ту же головку удаляется из аппарата для повторного нагревания.

Шнековые теплообменники применяют в таких химических процессах, когда необходимо



Рис. 1-13. Шнековый теплообменник.
1—подвод теплоносителя; 2—пустотелые шнеки; 3—корпус теплообменника; 4—приводной механизм.

особенно бережно обращаться с материалом при его нагревании и охлаждении. Они нашли применение для охлаждения солярового масла и цемента, непрерывного кальцинирования не-обожженного гипса и нагревания смоляных композиций в различных производствах.

Шнековые теплообменники занимают мало места, высокоэффективны и могут быть приспособлены к различным производственным условиям путем объединения нескольких аппаратов в один агрегат. Поверхность нагрева шнека при длине 3 м составляет 2,6 м².

ГЛАВА ВТОРАЯ

МАТЕРИАЛЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

2-1. СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Углеродистые стали — в основе сплавы железа с углеродом в количестве до 2,0%. Кроме углерода, эти стали содержат до 0,8% марганца и до 0,4% кремния, остающихся после раскисления, а также вредные примеси — до 0,055% серы и до 0,045% фосфора¹.

В качестве материала теплообменных аппаратов используют преимущественно малоуглеродистые нелегированные стали с содержанием углерода до 0,25%. Они очень пластичны и поэтому хорошо поддаются обработке давлением, гибке и правке в горячем и холодном состоянии, хорошо свариваются; они могут использоваться также в виде стального фасонного литья. В то же время эти стали характеризуются вполне удовлетворительными механическими свойствами: они достаточно прочны при температурах до 450°С, не склонны к хрупкому разрушению, хорошо воспринимают динамические нагрузки.

¹ В наиболее распространенных мартеновских сталях обыкновенного качества; в бессемеровской стали до 0,06% серы и до 0,08% фосфора.

Малоуглеродистые стали удовлетворительно сопротивляются коррозии в неагрессивных средах. Эти стали относятся к самым дешевым и наименее дефицитным металлам.

Особенности производства стали и стальных полуфабрикатов оказывают существенное влияние на механические свойства и качество готового изделия.

Сталь получают путем переплавки смеси стального лома и чугуна с добавкой железной руды в мартеновских печах (высококачественную сталь из тех же материалов получают и в электрических печах), а также путем продувки жидкого чугуна воздухом или кислородом в конвертерах. Мартеновским способом в СССР выплавляют около 80% стали, в конвертерах — около 10%, в электропечах — тоже около 10% (последним способом выплавляют преимущественно легированную сталь).

Большинство деталей теплообменных аппаратов изготавливают из углеродистой стали, выплавленной в основных мартеновских печах.

Продувкой в бессемеровском конвертере получают углеродистую сталь

с содержанием углерода до 0,5%. Бессемеровская сталь с содержанием углерода не более 0,12% хорошо сваривается, куется и прокатывается в тонкие листы. Ее применяют для производства сварных труб неответственного назначения, болтов, профилей, тонкой жести.

При одинаковом содержании углерода бессемеровская сталь имеет более высокую прочность и твердость, чем мартеновская. Поэтому, например, в мартеновской стали марки Ст. 3 содержится 0,14—0,22% С, а в бессемеровской стали той же марки не более 0,12%. Эта разница в свойствах объясняется тем, что в бессемеровской стали содержится повышенное количество растворенных азота и фосфора — элементов, упрочняющих сталь, но делающих ее одновременно и более хрупкой. Применение кислородного дутья в конвертерах в значительной степени ослабляет этот недостаток бессемеровской стали.

Сталь, полученная в конвертерах, сильнее загрязнена неметаллическими включениями, чем мартеновская и тем более электросталь. Объясняется это большей скоростью конвертерного процесса: плавка длится 25—30 мин. Образующиеся в жидком металле окислы не успевают полностью всплыть на поверхность ванны. Процесс выплавки стали в мартеновских и электропечах длится несколько часов, поэтому неметаллические включения успевают всплыть, и металл получается значительно чище.

Кроме способа выплавки, на качество стали и потовых изделий оказывает большое влияние способ раскисления, по которому стали делятся на спокойные, кипящие и полуспокойные.

При любом способе производства стали к концу процесса в ней содержится значительное количество кислорода в виде закиси железа. Этот кислород необходимо удалить, иначе пластичность стали будет невысока и сталь нельзя будет ковать, прокатывать и штамповать (нераскисленная сталь).

Раскисление спокойной стали производят сначала ферромарганцем, потом ферросилицием и заканчивают обычно алюминием при выпуске стали из печи. Этим достигается высокая степень раскисления, вследствие чего в процессе кристаллизации слитка спокойной стали не происходит бурного выделения газов.

Кипящую сталь до разливки раскисляют только ферромарганцем, при этом в жидком металле остается некоторое количество закиси

железа. После разливки стали в изложницы в еще не затвердевшем металле протекает реакция самораскисления. Выделяющаяся газообразная окись углерода перемешивает жидкий металл, он бурлит и выделяет искры. Создается впечатление, что сталь кипит — отсюда и название этой стали. По качеству, механическим свойствам, коррозионной стойкости кипящая сталь уступает спокойной.

Однако производство кипящей стали имеет очень большое значение. Бурление стали в изложнице не дает образоваться усадочной раковине, в результате чего резко сокращается вес головной обрезки и соответственно увеличивается выход годного. Поэтому большая часть ходовой строительной стали и стали для массовых неответственных изделий (листов общего назначения, проволоки, крепежа) выплавляется кипящей. Кипящей можно выплавлять только малоуглеродистую сталь (до 0,25% С).

Особо малоуглеродистые тонкие листы из кипящей стали (0,5—2 мм) представляют собой прекрасный материал для глубокой вытяжки.

Сталь, занимающая по степени раскисления промежуточное положение между спокойной и кипящей, называется полуспокойной. Ее можно выплавлять с содержанием углерода до 0,40—0,45%.

Обозначение марок кипящей стали сопровождается буквами «кп», полуспокойной — «пс».

Элементы теплообменных аппаратов, находящиеся под давлением и воздействием водяного пара и газов, желательно изготовлять из спокойной стали; строительные элементы (каркасы, ограждения и т. п.), а также детали общего неответственного назначения — из кипящей.

2-2. КЛАССИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

По назначению углеродистые стали разделяются на конструкционные и инструментальные. Конструкционные стали в свою очередь делятся на строительные и машиностроительные.

В строительных сталях содержание углерода обычно не превышает 0,25%, т. е. эти стали относятся к категории малоуглеродистых. Они хорошо свариваются, хорошо деформируются пластически в горячем и холодном состоянии, но прочность их относительно невысока.

Машиностроительные малоуглеродистые стали применяют обычно в качестве цементуемых, т. е. для деталей, подвергаемых поверхностному науглероживанию и закалке для повышения

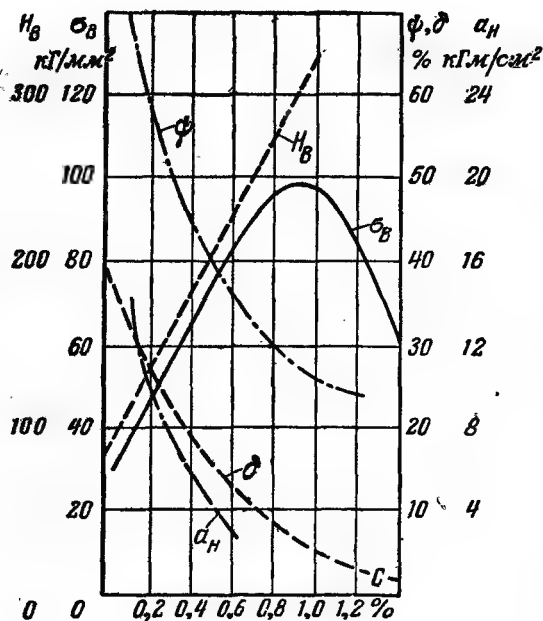


Рис. 2-1. Влияние углерода на механические свойства стали.

износостойкости, а также для крепежных деталей. В среднеуглеродистых машиностроительных сталях содержится от 0,3 до 0,7% углерода. Они прочнее строительных и могут подвергаться закалке с высоким отпуском, в результате которой их механические свойства улучшаются. Однако эти стали хуже свариваются и плохо поддаются пластической деформации в холодном состоянии.

Инструментальные стали содержат от 0,7 до 1,4% углерода. Влияние углерода на прочность и пластичность углеродистой стали после прокатки показано на рис. 2-1. С увеличением содержания углерода возрастают предел прочности и твердость стали, снижаются показатели пластичности (относительное удлинение и относительное сужение), а также снижается ударная вязкость. При 0,8% углерода прочность стали достигает максимального значения, после чего она начинает снижаться.

Изменение прочности стали в зависимости от содержания углерода легко объяснить характером изменения микроструктуры. Незакаленная углеродистая сталь при содержании углерода менее 0,8% состоит из кристаллитов свободного феррита и перлита, при 0,8% только из перлита и при содержании углерода более 0,8% из перлита и свободного цементита.

Феррит (твердый раствор углерода в α-железе) — очень пластичен и вязок, но непрочен. Перлит, смесь тонкодисперсных пластинок феррита и цементита придает стали прочность. Цементит (карбид железа) очень тверд, хрупок и статически прочен. При повышении в стали содержания углерода увеличивается содержание перлита и повышается прочность стали. Однако вместе с этим снижаются ее пластичность и ударная вязкость.

При 0,8% С (100% перлита) прочность стали достигает максимума. При дальнейшем увеличении содержания углерода избыточный свободный цементит образует оболочку вокруг перлитных зерен, что приводит к разрушению и некоторому снижению прочности стали.

Углеродистые стали классифицируют также по качеству, которое определяется содержанием серы и фосфора, способом производства и постоянством механических свойств. Чем меньше содержание этих примесей и колебание механических свойств, тем выше качество стали.

Углеродистые стали делят на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные.

2-3. СТАНДАРТЫ НА УГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ

По принятой в СССР системе стандарты металлических изделий делятся на три группы:

1. Сортаментные, устанавливающие форму и размеры изделий (сортовой прокат, болты, гайки, проволока и т. д.).

2. Стандарты — технические условия, устанавливающие маркировку, химический состав, свойства и правила приемки металла.

3. Стандарты, регламентирующие методы испытаний.

Стандарты на углеродистую сталь относятся ко второй группе.

Углеродистая сталь для теплообменных аппаратов изготавливается и поставляется по ГОСТ 380-60, 5520-50 и 1050-60, а фасонное литье по ГОСТ 977-58. Углеродистая горячекатаная сталь обыкновенного качества, изготовленная в мартеновских печах и бессемеровских конвертерах, поставляется по ГОСТ 380-60. Сталь по этому стандарту подразделяется на две группы — А и Б и одну подгруппу — В. Сталь, поставляемая по механическим свойствам, относится к группе А, поставляемая по химическому составу —

Механические свойства и область применения углеродистой стали обыкновенного качества

Марка стали	Временное сопротивление, кг/мм^2	Относительное удлинение, %, не менее		Диаметр оправок, d при испытании на загиб в холодном состоянии на 180°	Рабочая температура, $^\circ\text{C}$	Рабочее давление, кг/см^2	Виды испытаний	Цвет полос для маркировки окраской
		δ_{10}	δ_5					
Ст.2кп	32—42	26	31	$d=0$	От -15 до $+200$	16	Испытания от партии листов на растяжение и загиб	Желтый
Ст.3кп	38—40	23	27	$d=0,5s^{**}$ $d=2s^{**}$	От -30 до $+200$	50	Испытание от партии листов на растяжение, загиб и ударную вязкость	Красный Черный
Ст.4кп	41—43	22	26					
	44—47	21	25					
	42—44	21	25					
Ст.3	45—48	20	24	$d=0,5s$ $d=2s$	От -40 до $+425$	50	Испытание каждого листа на растяжение, загиб и ударную вязкость*	Красный Черный
	49—52	19	23					
	41—43	22	26					
	44—47	21	25					
Ст.4	42—44	21	25					
	45—48	20	24					
	49—52	19	23					
	41—43	22	26					

*При использовании сталей Ст.3 и Ст.4 в интервале температур от -30 до $+400^\circ\text{C}$ можно ограничиться испытанием от партии листов на растяжение, загиб и ударную вязкость.

** s —толщина листа.

к группе Б. Сталь подгруппы В поставляется с гарантированными механическими свойствами и дополнительными требованиями по химическому составу.

По группе А поставляются стали, маркируемые от Ст. 0 до Ст. 7. Номер марки представляет условную цифру, характеризующую ее механические свойства и соответствующее им содержание углерода. Способ изготовления стали выбирается заводом-изготовителем, если он не оговорен специально в заказе. В сертификате указывается способ изготовления стали (мартеновская или бессемеровская, кипящая, спокойная или полуспокойная). Для обозначения марок кипящей стали добавляются буквы «кп», например Ст. 3кп.

Стали группы А применяют в тех случаях, когда металл используют для изготовления деталей без термической обработки. Необходимая прочность изделия обеспечивается выбором стали соответствующей марки. Механические свойства углеродистой горячекатаной стали обыкновенного качества группы А по ГОСТ 380-60 и область ее применения приведены в табл. 2-1.

Для сталей группы А предусматриваются следующие показатели механических свойств: временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение. Для малоуглеродистых сталей марок от Ст. 0 до Ст. 5 предусмотрено испытание на холодный загиб (технологическая проба).

Гарантируемыми характеристиками для сталей группы А являются временное сопротивление растяжению и относительное удлинение. Удовлетворительные результаты при испытании на загиб и предел текучести обеспечиваются по требованию заказчика. Сталь может быть поставлена с гарантируемой величиной ударной вязкости при комнатной температуре.

Химический состав стали, поставляемой по группе А, указывается в сертификате, но браковочным признаком не является. По требованию заказчика может быть обеспечено в мартеновской стали содержание серы не более 0,055% и фосфора не более 0,045%, а в бессемеровской стали — серы не более 0,060% и фосфора не более 0,080%.

По соглашению сторон сталь группы А может поставляться в термически обработанном виде. В этом случае нормы механических свойств устанавливаются техническими условиями.

Сталь, подвергающаяся термической обработке, поставляется по группе Б ГОСТ 380—60. Сталь этой группы маркируется дополнительно буквами М — мартеновская или Б — бессемеровская; например МСт. 3, БСт. 5. Номер марки также представляет условное число, характеризующее химический состав стали и ее механические свойства. В стандарте установлены пределы содержания в стали углерода, марганца, кремния, серы и фосфора.

Сталь группы Б может быть спокойной или кипящей. Марка кипящей стали обозначается буквами «кп», например, БСт. 3кп.

Для сталей подгруппы В гарантируются одновременно химический состав, временное сопротивление, относительное удлинение, а также предел текучести.

По требованию заказчика для стали подгруппы В гарантируются удовлетворительные испытания на загиб в холодном состоянии, ударная вязкость при комнатной температуре, ударная вязкость при температуре -20°C и ударная вязкость после механического старения. Результаты испытаний должны указываться в сертификате.

Для улучшения условий использования стали, хранения на складах и транспортировки производят ее клеймение и цветовую маркировку окраской в виде полос по концам проката.

На сталь подгруппы В по требованию заказчика наносится дополнительная полоса алюминиевой окраски. Без маркировки окраской сталь может поставляться только при согласии заказчика. В сертификате указываются группа или подгруппа и марка стали.

Углеродистая сталь в виде листов толщиной от 8 до 60 мм, предназначенных для изготовления теплообменных аппаратов и котлов, поставляется по ГОСТ 5520-50. Этим стандартом предусматривается поставка выплавляемых в мартеновских печах сталей

марок Ст. 3, 15К, 20К и 25К с содержанием серы и фосфора до 0,045% каждого элемента (табл. 2-2).

В сталях марок 15К, 20К и 25К буква К указывает основное назначение этих сталей (котельный лист), числа, — среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Качественная конструкционная горячекатаная и кованая сортовая сталь выплавляется в мартеновских печах или электропечах и поставляется по ГОСТ 1050-60. В части норм химического состава стандарт распространяется также на слитки, обжатую болванку, слябы, заготовки, листы, ленты, широкополосную сталь, трубы, проволоку, поковки и штамповки. По этому стандарту гарантируются химический состав и механические свойства стали.

По химическому составу сталь делится на две группы: I — с нормальным содержанием марганца и II — с повышенным содержанием марганца. По ГОСТ 1050-60 поставляются стали группы I со средним содержанием углерода: восемь (марка 08), десять (марка 10), пятнадцать сотых процента и далее через каждые пять сотых процента до содержания углерода 85 сотых процента (марка 85), т. е. число в марках стали группы I выражает среднее содержание углерода в сотых долях процента. Первые пять марок стали — от 08 до 20 включительно — могут поставляться как кипящими, так и спокойными. Для обозначения марки кипящей стали после цифр ставят буквы «кп», например, сталь 10кп. В качественных углеродистых сталях допускается меньшее содержание серы и фосфора, введены ограничения по содержанию никеля, хрома и меди.

Для обозначения марок стали группы II после чисел, указывающих сред-

Таблица 2-2

Химический состав (%) и область применения листовой углеродистой котельной стали (ГОСТ 5520-50)

Марки стали	Предельные параметры среды	C	Si	Mn	S	P	Cr*	Ni*	Cu*
				не более					
Ст.3	8 атм и 120° C 60 атм и 450° C	0,12—0,23	—	—	0,045	0,045	0,30	0,30	0,30
15К		0,12—0,20	0,15—0,30	0,65	0,045	0,045	0,30	0,30	0,30
20К		0,16—0,24	0,15—0,30	0,65	0,045	0,045	0,30	0,30	0,30
25К		0,21—0,28	0,15—0,30	0,80	0,045	0,045	0,30	0,30	0,30

*Суммарное содержание хрома, никеля и меди не должно превышать 0,7%.

Механические свойства и область применения качественных углеродистых сталей

Марка сталл	Предел текучести, кг/мм ²	Временное сопротив- ление, кг/мм ²	Относя- тельное удлине- ние, %	Относ- тельное сужение, %	Ударная вязкость, кг·м/см ²	* Область применения	Цвет по- лос для маркиров- ки окраской
	не менее						
10 15 20	21 23 25	34 38 42	31 27 25	55 55 55	— — —	Листы для рабочей темпе- ратуры стенки от —40° до +450° С, давление не огра- ничено	Белый
10 20	— —	32 40	26 24	— —	— —		
25 30 35 40	28 30 32 34	46 50 54 58	23 21 20 19	50 50 45 45	9 8 7 6		

* Трубы мягкие (М).

нее содержание углерода, ставят букву Г, например сталь 20Г. По группе II поставляется сталь марок 15Г, 20Г, 25Г, 30Г, 35Г, 40Г, 45Г, 50Г, 60Г, 65Г и 70Г. При одинаковом содержании углерода стали с повышенным содержанием марганца отличаются от сталей группы I повышенной прочностью. Стали 15Г, 20Г и 25Г хорошо свариваются. Механические свойства качественной углеродистой стали по ГОСТ 1050-60 и область ее применения приведены в табл. 2-3.

При изготовлении теплообменных аппаратов сталь группы II может быть использована для некоторого уменьшения их веса.

Химический состав готового проката и поковок из-за химической неоднородности (ликвации) может несколько отличаться от состава, указанного в сертификате по ковшевой пробе. В стандарте даны пределы допускаемого отклонения от заданного химического состава в готовом прокате.

По требованию заказчика сталь поставляется с суженным интервалом содержания углерода, пониженным содержанием серы, фосфора, кремния, хрома и никеля. Ограничения по содержанию хрома и никеля введены из условия хорошей свариваемости стали, а по содержанию кремния — из условия хорошей деформируемости.

Стали марок от 20 до 50 включительно могут поставляться с содержанием бора (в пределах от 0,002 до 0,006%), резко повышающим прокаливаемость стали. В этом случае в конце обозначения марки ставится буква Р.

По требованию заказчика сталь может поставляться с нормированной чистотой по неме-

таллическим включениями, что особенно важно для деталей, работающих на износ от трения.

Сталь может поставляться с гарантированной ударной вязкостью.

Макроструктура стали при проверке на изломах или специально подготовленных срезах — темплетях — не должна иметь следов усадочной раковины и рыхлости, а также пузырей, расслоений, трещин, неметаллических включений и флокенов, видимых невооруженным глазом. Сталь всех марок должна маркироваться путем окраски торцов или концов несмываемой краской.

Фасонное стальное литье поставляется по ГОСТ 977-58. Маркировка по этому стандарту аналогична маркировке качественных сталей. Число в марке стали обозначает содержание углерода в сотых долях процента, а буква Л — литье, например сталь 15Л. По ГОСТ 977-58 поставляются стали от 15Л до 55Л через каждые пять сотых долей процента углерода. Сталь по этому стандарту выплавляется только спокойной.

В зависимости от способа выплавки и содержания серы и фосфора отливки относятся к трем группам: первая группа — отливки обыкновенного качества, вторая — повышенного качества, третья — особого качества.

Литая углеродистая сталь для отливок обыкновенного и повышенного качества может выплавляться в мартеновских печах и конвертерах. Сталь для отливок особого качества выплавляется только в мартеновских печах.

Механические свойства фасонных отливок углеродистой стали после нормализации или отжига и область их применения

Марка стали	Предел текучести, кг/мм ²	Временное сопротив- ление, кг/мм ²	Относительное удлине- ние, %	Относи- тельное сужение, %	Ударная вязкость, кг·м/см ²	Область применения
	не менее					
15Л	20	40	24	35	5	Отливки обыкновенного качества при температуре стенки от —15° до +400° С и давлении не более 50 кг/см ² Отливки повышенного и особого качества при температуре стенки от —40° до +450° С, давление не ограничено
20Л	22	42	22	35	5	
25Л	24	45	19	30	4	
30Л	26	48	17	30	3,5	

Остаточное содержание хрома, никеля и меди в стали всех трех групп не должно превышать 0,3% каждого элемента. Содержание хрома, никеля и меди выше этого предела не является браковочным признаком, если содержание этих элементов не было оговорено при заказе.

Все отливки должны подвергаться нормализации или отжигу. Механические свойства металла отливок II и III групп в нормализованном или отожженном состоянии должны соответствовать табл. 2-4.

Если по договоренности с заказчиком требуется другая термическая обработка, то нормы механических свойств оговариваются техническими условиями.

2-4. СТАЛЬНЫЕ ЛИСТЫ

При производстве теплообменных аппаратов основными полуфабрикатами служат стальные листы, трубы и сортовой прокат, последний применяется для опор и каркасов. Из листов изготавливают корпуса теплообменников, конденсаторов, ректификационных колонн. Стальные листы и трубы поставляются обычно в термически обработанном состоянии; после прокатки их подвергают нормализации или нормализации с отпускком при 600—650° С. Сортовой прокат после прокатки не подвергается термической обработке.

Листовая сталь, применяемая для сосудов, работающих под давлением, и их элементов, выплавляется в мартеновских печах или в электропечах.

Листы из кипящей углеродистой стали обыкновенного качества могут применяться для сосудов, работающих под давлением до 50 атм в интервале температур от —30° до +200° С. Толщина листов кипящей стали для сосудов, работающих под давлением, не должна превышать 26 мм. Листы из спокойной углеродистой стали обыкновенного качества могут применяться в этих условиях при температурах от —40 до +425° С и давлении не выше 50 атм, а из спокойной углеродистой стали марок 15К, 20К и 25К — в интервале температур от —40 до +475° С без ограничения давления.

Область применения стальных листов из углеродистой стали указана в «Правилах устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», утвержденных Госгортехнадзором СССР, обязательных для советов народного хозяйства, министерств и ведомств. Эти «Правила» определяют требования к устройству, изготовлению, установке и содержанию сосудов, работающих под давлением выше 0,7 атм, цистерн, баллонов и бочек для перевозки сжиженных газов.

Аналогичные правила существуют для котлов и трубопроводов горячей воды и пара.

«Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды» определяют требования к устройству, изготовлению, монтажу, содержанию и освидетельствованию стационарных трубопроводов и трубопроводов передвижных электростанций, транспортирующих водяной пар с давлением выше 2 атм или горячую воду с температурой выше 120° С. В «Правилах» указаны области

применения различных материалов для трубопроводов, конструктивные требования к трубопроводам, правила изготовления и монтажа. Правила регламентируют требования к эксплуатации трубопроводов, их окраске и пояснительным надписям на них. В Правилах указывается также порядок расследования аварий и несчастных случаев.

Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов определяют требования к устройству, изготовлению, установке, содержанию и освидетельствованию стационарных и передвижных паровых котлов, пароперегревателей и водяных экономайзеров с рабочим давлением выше 0,7 атм, а также водогрейных котлов с температурой подогрева воды выше 115°С.

Для изготовления теплообменных аппаратов используют преимущественно листы толщиной более 4 мм, изготавливаемые горячей прокаткой.

Качество металла листов должно соответствовать ГОСТ 5520-50, 1050-60 и 380-60.

Размеры листов указываются при заказе.

Листы, поступающие для изготовления аппаратуры, должны быть ровно обрезаны; при толщине более 40 мм допускается огневая резка. Поверхность и торцы листов должны быть чистыми и не иметь трещин, плен, закатов, шлаковых включений и расслоений. Допускаются риски и царапины глубиной не более половины допуска на толщину листа.

Можно зачищать лист наждачным кругом, но толщина его после зачистки должна оставаться в пределах допуска. Заварка поверхностных дефектов листов не допускается. Все листы толщиной более 12 мм подвергаются внешнему осмотру каждый.

Листы толщиной менее 12 мм поставляются партиями, а более 12 мм — штучно. На каждом листе выбиваются марка стали, номер плавки и листа, клеймо отдела технического контроля (ОТК) и марка завода-изготовителя.

Проверка соответствия химического состава листов ГОСТ и испытания механических свойств проводятся на металлургическом заводе, поставляющем листы. Листы сопровождаются заводским сертификатом, в котором указываются номер листа, номер плавки, химический состав и механические свойства листа.

2-5. СТАЛЬНЫЕ ТРУБЫ

Трубы служат основным материалом для поверхностей нагрева теплообменников и для трубопроводов.

Стальные трубы изготавливают со швом и без шва. В теплообменных аппаратах в основном применяют бесшовные трубы. По «Правилам устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», допускается применение углеродистых сварных труб со швом на давление до 16 атм и на температуру до 300°С.

Трубы со швом изготавливают из полосы, называемой штрипсом. Штрипсы нагревают в заготовочной печи до 900—1000°С и на специальном стане свертывают с помощью воронок в трубную заготовку, причем кромки штрипса при наружном диаметре трубы более 50 мм заходят одна за другую. Свернутую заготовку нагревают в печи до 1300—1350°С и прокатывают на специальной цилиндрической оправке на двухвалковом трубопрокатном стане (стане дуо). При прокатке кромки свариваются «внахлестку» под воздействием высокого давления и температуры.

Трубы диаметром менее 50 мм изготавливают обычно сваркой встык путем протягивания разогретого до 1300—1350°С штрипса через воронку. Кромки его не заходят одна за другую, а упираются друг в друга, так как ширина штрипса немного больше периметра отверстия в воронке. В результате протяжки через воронку происходит кузнечная сварка встык. Далее трубы проходят калибровку и отделочные операции.

В настоящее время широко применяют различные методы изготовления труб со швом с помощью электросварки. Трубы с продольным швом изготавливают методом контактной сварки, а трубы со спиральным швом — методом автоматической сварки под флюсом.

Прочность трубы в шве, т. е. в месте сварки, ниже, чем металла трубы, поэтому для ответственных условий работы — высоких давлений и температур, — сварные трубы не применяют. Для таких условий используют бесшовные трубы.

Бесшовные трубы из углеродистой стали обыкновенного качества можно применять при давлении до 50 атм и температуре от —30 до 350°С, а трубы из качественной углеродистой стали при температурах от —40 до +475°С при давлении до 160 атм.

Бесшовные трубы изготавливают прокаткой. Сначала из круглой обжатой заготовки на прошивном стане косой прокатки изготавливают полую толстоствольную заготовку (пильзу). Некоторые высоколегированные стали, предназначенные для работы при высоких температурах

и в агрессивных средах, не поддаются прошивке; гильзы для труб из таких сталей изготавливают путем сверления сплошных круглых заготовок.

Короткую гильзу, имеющую толстые стенки и неправильную цилиндрическую форму, прокатывают в трубу, уменьшая толщину стенок, увеличивая длину и придавая ей необходимую точную форму и размеры. Для раскатки гильзы применяют пилигримовые (иначе дильгерные), автоматические и непрерывные станы.

На пилигримовом стане можно прокатывать трубы диаметром от 40 до 600 мм, длиной до 30 м.

Распространенный способ прокатки труб — раскатка гильзы на оправке в автоматических станах. В стан гильза попадает после прошивки на стане косой прокатки. Автоматический стан имеет два вала, в каждом из которых выточены полукруглые ручьи, формирующие наружную поверхность трубы. Совокупность двух ручьев образует калибр. Трубу прокатывают за два-три пропуска через калибры уменьшающегося диаметра. На автоматических станах можно прокатывать трубы длиной 10—11 м.

Из автоматического стана труба выходит с недостаточно гладкой поверхностью, овально-го сечения и несколько разностенной, поэтому далее труба поступает на обкатную машину, работающую по принципу прошивных станов с коническими вальками. Прокатка трубы заканчивается калировкой наружного диаметра трубы в специальных непрерывных двухвалковых калибровочных станах.

В калибровочном стане труба удлиняется и уменьшается в диаметре.

Гильзу можно раскатывать также на непрерывных станах, представляющих собой группу клетей, имеющих по два вала с полукруглыми ручьями. Этот способ очень производительен.

На станах горячей прокатки могут быть получены трубы наружным диаметром не менее 40 мм при толщине стенки не менее 3 мм. Однако часто, особенно в теплообменных аппаратах, требуются трубы меньшего диаметра и с меньшей толщиной стенки. Для производства тонкостенных труб применяют холодное волочение и холодную прокатку. При холодной прокатке поверхность труб получается более чистой, чем при волочении. Станы холодной прокатки работают по принципу пилигримовых станов.

Горячекатаные трубы из углеродистой стали могут поставляться без термической обработки, если температура конца прокатки не ниже 850—875°С. Если эта температура ниже или труба проходила прокатку или волочение в холодном состоянии, то обязательна термическая обработка. Все трубы из легированных сталей независимо от температуры конца прокатки подвергаются термической обработке, режим которой указывается в технических условиях на трубы.

Трубы изготавливают по различным стандартам в зависимости от их назначения и материала.

Трубы для водопроводных и газовых линий поставляются по ГОСТ 3262-55. Выбор способа производства труб — со швом, электросварные, бесшовные — определяется заводу-поставщику.

По ГОСТ 3262-55 поставляются трубы с наружным диаметром от 13,5 до 165 мм и толщиной стенки от 2,25 до 5,5 мм. Для труб с условным проходом до 40 мм допускаются отклонения наружного диаметра в пределах $\pm 0,5$ мм, для труб с условным проходом свыше 40 мм — $\pm 1\%$. Действительная толщина стенки трубы в любом месте должна быть не менее 85% номинальной.

Трубы изготавливают с резьбой по концам для соединения при помощи муфт или со скошенными кромками под сварку. Могут также поставляться трубы без обработки концов. Трубы без резьбы имеют длину от 4 до 12 м, с резьбой — от 4 до 8 м. Трубы поставляют партиями весом не более 20 т, в которые входят трубы одного диаметра, толщины стенки и марки стали. В партии допускается до 5% коротких труб длиной от 2 до 4 м. По требованию потребителя трубы должны поставляться определенной длины с допускаемым отклонением ± 10 мм. Трубы могут поставляться также кусками мерной или кратной длины с припуском на каждую разрезку 5 мм.

По ГОСТ 3262-55 изготавливают трубы как с необработанной поверхностью (черные), так и оцинкованные. Все трубы проходят гидравлическое испытание давлением 20 атм для обыкновенных (не усиленных) труб и 30 атм — для усиленных с увеличенной толщиной стенки.

Порядок маркировки труб поясняется следующими примерами. Обыкновенная неоцинкованная труба с условным проходом 20 мм и с концами без резьбы обозначается:

Труба 6/р 20 ГОСТ 3262-55.

Такая же труба, но с конической резьбой обозначается:

Труба К20 ГОСТ 3262-55.

Если же труба с конической резьбой имеет цинковое покрытие, то она обозначается:

Труба 0-K20 ГОСТ 3262-55.

Трубы, изготавливаемые путем электросварки сопротивлением из заготовки в виде ленты и применяемые для различного рода трубопроводов, поставляются по ГОСТ 1753-53.

По ГОСТ 1753-53 поставляются трубы с наружным диаметром от 5 до 152 мм при толщине стенки от 0,5 до 5,5 мм.

По состоянию металла трубы поставляются мягкими (М), полутвердыми (П) и твердыми (Т). Металл твердых труб обладает наиболее высокой прочностью, но пониженной пластичностью.

На поверхности труб не допускаются трещины, плены, закаты, глубокие риски. На шве трубы по внутренней ее поверхности может быть грат. По требованию потребителя на трубах с внутренним диаметром более 20 мм грат должен быть срезан или сплюснен до высоты не более 0,5 мм.

Концы труб должны быть обрезаны под прямым углом и зачищены от заусенцев. На трубах, которые будут соединяться при помощи сварки, при диаметре не менее 114 мм снимают по требованию потребителя фаску под углом 35—40° к торцу трубы.

Мягкие и полутвердые трубы должны выдерживать сплющивание на $\frac{1}{3}$ наружного диаметра (технологическая проба).

Трубы, работающие под внутренним давлением, что должно быть оговорено в заказе, проходят гидравлическое испытание. При наружном диаметре до 102 мм труба должна выдерживать испытание давлением до 60 кг/см^2 , а при большем диаметре — до 30 кг/см^2 . Однако в любом случае давление при гидравлическом испытании не должно превышать вычисленного по следующей формуле:

$$p = \frac{200sR}{D_B} \quad [\text{кг/см}^2],$$

где p — гидравлическое давление, кг/см^2 ;

s — минимальная допускаемая толщина стенки, мм;

D_B — номинальный внутренний диаметр, мм;

R — допускаемое напряжение, кг/мм^2 , равное 35% временного сопротивления.

При гидравлическом испытании труба должна находиться под установленным давлением не менее 5 сек.

Порядок маркировки труб по ГОСТ 1753-53 поясняется следующим примером.

Труба М25×2×2 000кр-10 ГОСТ 1753-53 — мягкая труба наружным диаметром 25 мм при толщине стенки 2 мм; длина трубы — 2 000 мм или кратная этому размеру. Материал — сталь марки 10 по ГОСТ 1050-60 в соответствии с требованиями ГОСТ 1753-53.

Трубы поставляют партиями, которые сопровождаются сертификатом. По требованию заказчика для предотвращения ржавления трубы должны быть покрыты нейтральной смазкой внутри и снаружи.

Стальные электросварные трубы с продольным швом диаметром от 426 до 1 620 мм при толщине стенки от 4 до 16 мм изготавливают по ГОСТ 4015-58 из листовой стали по ГОСТ 500-58. Требования, предъявляемые к этим трубам, аналогичны требованиям к трубам по ГОСТ 1753-53. Однако пробное давление при гидравлическом испытании выбирается на основе допускаемого напряжения, принимаемого равным 85% от предела текучести.

Стальные электросварные трубы большого диаметра со спиральным швом должны соответствовать требованиям ГОСТ 8696-58. Трубы изготавливаются путем односторонней электродуговой сварки под флюсом. Материалом для изготовления труб служит листовая сталь марок Ст. 2, Ст. 3, Ст. 3кп, МСт. 2, МСт. 3 и МСт. 3кп по ГОСТ 380-60. Марка стали должна быть указана в заказе. Трубы применяют в основном для трубопроводов. Длина труб может быть от 8 до 18 м. В каждой партии допускается до 8% по весу укороченных труб длиной не менее 6 м.

Бесшовные стальные трубы изготавливают диаметром от 1 до 800 мм с толщиной стенки от 0,1 до 75 мм. Размеры бесшовных труб регламентируются следующими стандар-

тами и ведомственными техническими условиями: ГОСТ 8732-58, ГОСТ 8734-58, ЧМТУ¹ 2579-54, ЧМТУ 2580-54. Технические условия на трубы приведены в ГОСТ 8731-58 и 8733-58. Материал бесшовных труб общего назначения — качественная углеродистая сталь по ГОСТ 1050-60.

По ГОСТ 8732-58 и ГОСТ 8734-58 изготавливают бесшовные трубы из качественной углеродистой стали марок 10 и 20. Эти трубы могут применяться при температуре от -40 до 475°C включительно и при давлении не более 160 атм. Для более высоких температур и давлений трубы изготавливают из легированной стали по специальным техническим условиям и стандартам. Принцип маркировки бесшовных труб поясняется на примере трубы длиной 6000 мм, диаметром 70 мм с толщиной стенки 3,5 мм из стали марки 10, изготовленной по ГОСТ 8734-58. Такая труба имеет обозначение:

Труба 70×3,5×6000-10 ГОСТ 8734-58.

Технические условия на трубы определяют их размеры, состояние поверхности и требования к химическому составу и механическим свойствам металла.

Требования к состоянию поверхности труб такие же, как и к поверхности листов. Внутренняя поверхность толстостенных труб большого диаметра зачищается и тщательно осматривается при помощи перископа.

Трубы для работы под давлением должны проходить гидравлические испытания пробным давлением.

На трубы завод-изготовитель выдает сертификат, в котором указываются результаты плавочного и контрольного химических анализов, результаты механических испытаний металла труб и пробное гидравлическое давление, если трубы проходили гидропробу. При диаметре более 35 мм и толщине стенки более 3 мм маркируется каждая труба. На расстоянии не более 100—200 мм от одного из концов трубы должны быть выбиты клейма завода-изготовителя, ОТК, а также марка стали.

¹ Технические условия бывшего Министерства черной металлургии СССР.

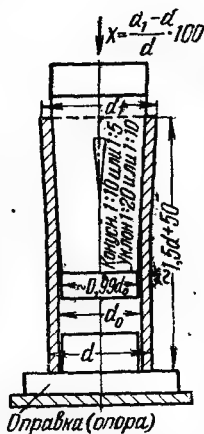


Рис. 2-2. Испытание трубы на раздачу.

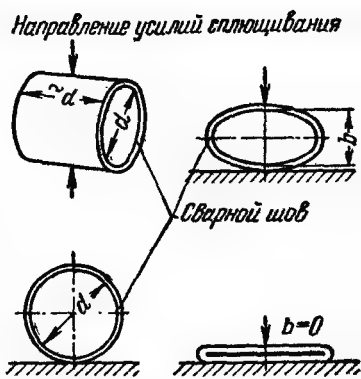


Рис. 2-3. Испытание трубы на сплющивание.

По требованию заказчика трубы должны подвергаться технологическим пробам на сплющивание и на раздачу. Эти пробы помогают определить, как будут трубы вальцеваться и гнуться.

Испытание на раздачу производят на куске трубы длиной $L = 1,5d + 50$ мм, где d — наружный диаметр трубы, мм. В трубу вагоняется пробка конусностью 1:10 или 1:5 (оговариваемой в ТУ на трубы) молотком, кувалдой или под прессом (рис. 2-2). Величина раздачи x определяется по формуле

$$x = \frac{d_1 - d}{d} 100\%,$$

где d_1 — максимальный наружный диаметр трубы при невнутой оправке. Необходимая величина раздачи указывается в технических условиях.

Для испытания на сплющивание берут кусок трубы длиной, равной наружному диаметру трубы. В технических условиях задается величина просвета между стенками трубы при сплющивании. Труба должна выдержать сплющивание до заданного размера зазора b без образования трещин (рис. 2-3). При испытании сварных труб сварной шов должен располагаться на боковой поверхности трубы.

Технологические пробы на сплющивание и раздачу производятся как в холодном, так и в горячем состоянии в зависимости от требований технических условий.

2-6. СТАЛЬНЫЕ ФАСОННЫЕ ОТЛИВКИ

Многие детали теплообменных аппаратов (корпуса вентиля и задвижек, тройники, корпуса и роторы центробежных насосов и др.) изготавливают отливкой из стали.

Отливки из углеродистой стали могут поставляться по ГОСТ 977-58 и по особым техническим условиям. К отливкам, поставляемым по ГОСТ

977-58, предъявляются следующие требования.

Отливки должны быть очищены заводом-поставщиком от песка и окалины. Прибыли и литники должны быть удалены, а места их расположения зачищены. Если отливки подвергались огневой резке, то они должны быть подвергнуты после нее термической обработке. С согласия заказчика термическая обработка после огневой резки отливок из сталей 15Л и 20Л может не производиться. В случаях, когда завод-изготовитель устраняет дефекты отливок заваркой, она должна производиться до окончательной термической обработки.

Потребитель имеет право подвергнуть полученные отливки поверочным испытаниям. Отливки обыкновенного качества могут быть проверены по химическому составу, на соответствие размеров и по внешнему виду. В отливках повышенного качества, кроме того, проверяют предел текучести и относительное удлинение на пятикратном образце. При проверке отливок особого качества определяют также ударную вязкость.

Механические свойства определяют по результатам испытания одного образца, а величину ударной вязкости — двух образцов. В случае неудовлетворительных испытаний проводят повторные испытания на удвоенном числе образцов.

Отливки весом более 5 кг должны иметь на необрабатываемой зачищенной поверхности клеймо ОТК завода-поставщика и маркировку в соответствии с техническими условиями и требованиями чертежа. Если отливку нельзя клеймить, то к ней прикрепляют бирку с указанными сведениями.

Отливки сопровождаются сертификатом, в котором указываются:

- а) наименование организации или ведомства, в систему которого входит завод-поставщик;
- б) наименование завода-поставщика и его местонахождение;
- в) номер группы литья (обыкновенного, повышенного или особого качества);
- г) номер чертежа или детали;
- д) марка стали;
- е) результаты химического анализа;
- ж) число и вес отливок;
- з) результаты специальных испытаний, если они проводились.

Отливки ответственного назначения подвергают рентгеновскому просвечиванию для выявления внутренних дефектов: трещин, усадочных, газовых и земляных раковин, шлаковых включений. Трещины, большие раковины и шлаковые включения должны быть вырублены с последующей заваркой мест вырубки. После устранения дефектов отливки подвергают повторному просвечиванию. Отдельные небольшие раковины и шлаковые включения при сохранении толщины стенки в пределах минусового допуска можно оставлять. Глубина дефектов на подлежащих обработке поверхностях не должна превышать $\frac{2}{3}$ припуска на обработку.

Согласно «Правилам устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», стальное литье обыкновенного качества из углеродистой стали можно применять при температуре внутренней среды от -15 до $+400^\circ\text{C}$ и давлении до 50 атм, а повышенного и особого качества — от -40 до 450°C без ограничения давления. Для более высоких температур применяют литье из легированных сталей.

Стальное литье, предназначенное для работы под внутренним давлением, проходит гидравлическое испытание давлением, превышающим в 1,5 раза рабочее, но не менее 3 атм. Если деталь должна работать при температуре выше 400°C , испытание проводят двойным рабочим давлением.

2.7. ПОКОВКИ И ШТАМПОВКИ

При изготовлении теплообменных аппаратов применяют штампованные крышки и днища, а также поковки для деталей сложной формы: тройников, фланцев, толстостенных корпусов сосудов и т. п. Крупные поковки изготовляют из сталей марок 15, 20, 25 и 22К по ГОСТ 8479-57 и применяют при рабочих температурах от -40 до $+450^\circ\text{C}$.

В ГОСТ 8479-57 поковки отнесены к различным категориям прочности — в зависимости от комплекса механических свойств. Категории прочности установлены от КП18 до КП80, категории от КП36 до КП80 разделяются по уровню пластичности на две группы: А — с повышенной пластичностью, Б — с нормальной пластичностью. При испытаниях образцов, вырезаемых вдоль направления течения металла при ковке или штамповке, по-

лучаются более высокие механические свойства, чем при испытании поперечных образцов. При проведении испытаний на поперечных образцах показатели прочности и пластичности снижают по соглашению между поставщиком и заказчиком.

Основным критерием при отнесении поковки к той или иной категории прочности служит предел текучести. Например, для категории прочности КП32 предел текучести должен быть не менее 32 кг/мм^2 . Категория прочности одновременно определяет минимальное допускаемое временное сопротивление. Требуемые величины относительного удлинения, относительного сужения и ударной вязкости тем меньше, чем больше диаметр или толщина поковки. В ГОСТ 8479-57 указаны интервалы, в которых может изменяться твердость по Бринеллю для данной категории прочности.

Механические свойства мелких поковок определяют путем проведения одного испытания для партии поковок из стали одной плавки. Если вся партия поковок из стали одной плавки не помещается в печи при нагреве под ковку или термическую обработку, то проводят одно испытание для партии деталей, загружаемой в печь. Механические свойства можно определять на специально откованных пробах той же плавки, прошедших термическую обработку вместе с партией поковок.

Механические свойства крупных и ответственных поковок определяют для каждой поковки. Каждая поковка имеет специальные припуски, из которых после термической обработки изготавливают образцы для механических испытаний.

Химический состав определяют для партии поковок из стали одной плавки.

При неудовлетворительных результатах какого-либо испытания производят повторное испытание на удвоенном числе образцов. При неудовлетворительном результате повторного испытания хотя бы одного образца поковки бракуют.

Ответственные поковки подвергают рентгеновскому просвечиванию для выявления внутренних дефектов.

С целью проверки прочности и плотности поковок, работающих под внутренним давлением, производят гидравлическое испытание. При рабочем давлении ниже 5 атм пробное давление принимают равным полуторному рабочему, но не менее 2 атм. При рабочем давлении 5 атм или выше испытание производят давлением, превы-

шающим рабочее на 25%, при этом пробное давление должно превышать рабочее не менее чем на 3 атм.

2-8. КРЕПЕЖНЫЕ ДЕТАЛИ

Для изготовления крепежных деталей теплообменных аппаратов широко используют углеродистые стали. К материалу для болтов, шпилек и гаек предъявляют следующие требования: высокая прочность, хорошая обрабатываемость при резании, хорошая деформируемость при холодной и горячей обработке давлением. Материал болтов и шпилек, изготавливаемых обработкой на металлорежущих станках, должен обладать хорошей обрабатываемостью при резании. Если болты и шпильки изготавливают путем высадки, а резьба накатывается роликом, материал крепежных деталей должен хорошо деформироваться в холодном состоянии без образования трещин.

Обычно для изготовления болтов применяют стали Ст. 3, Ст. 4 и Ст. 5 по ГОСТ 380-60, а также 20, 25, 30, 35, 40 по ГОСТ 1050-60. При высоких температурах или при требовании высокой коррозионной стойкости применяют легированные стали.

Для изготовления крепежных деталей, работающих при температуре рабочей среды не выше 350°C и давлении не более 21 атм, применяют углеродистую сталь по ГОСТ 380-60 (Ст. 3, Ст. 4, Ст. 5). Качественную углеродистую сталь по ГОСТ 1050-60 применяют для шпилек и болтов при температуре до 435°C , а для гаек — до 480°C (давление не ограничивается).

2-9. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

В составе легированных сталей, кроме элементов, характерных для углеродистых сталей, содержатся намеренно вводимые так называемые легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Ti, Cu, Al, Nb и др.).

Главное назначение легирования:

1. Повышение прочности стали без применения термической обработки путем упрочнения феррита растворением в нем легирующих элементов.
2. Повышение прочности и ударной вязкости путем увеличения устой-

чивости аустенита и тем самым увеличения прокаливаемости.

3. Придание стали специальных свойств, из которых для изготовления теплообменных аппаратов особое значение имеют коррозионная стойкость, в частности окалиностойкость (жаростойкость), и жаропрочность.

Жаропрочными называют стали, сохраняющие достаточно высокую прочность и коррозионную стойкость при повышенных температурах; жаростойкими (окалиностойкими) — стали, хорошо сопротивляющиеся окислению при высоких температурах.

В зависимости от содержания легирующих элементов легированные стали делят на три группы: низколегированные — содержащие до 4—5% легирующих добавок; среднелегированные — от 4—5 до 10—12%; высоколегированные — более 10—12% (до 50%).

Легирующие элементы могут растворяться в феррите или аустените, образовывать карбиды, давать интерметаллические соединения, располагаться в виде включений, не взаимодействуя с ферритом или аустенитом, а также с углеродом. В зависимости от того, как взаимодействует легирующий элемент с железом и углеродом, он по-разному влияет на свойства стали.

В феррите в большей или меньшей степени растворяются все элементы.

Растворение легирующих элементов в феррите приводит к упрочнению стали без термической обработки. При этом твердость и предел прочности возрастают, а ударная вязкость обычно снижается. Только хром в количестве до 1% и никель повышают ударную вязкость феррита. Наиболее эффективно действие никеля: одновременно с упрочнением феррита он резко повышает его ударную вязкость при комнатных и особенно при минусовых температурах. Поэтому для изготовления элементов аппаратов, работающих при минусовых температурах, применяют стали, легированные никелем.

Легирующие элементы, расположенные в периодической системе левее железа, образуют в стали карбиды, более стойкие, чем карбид железа — цементит. При легировании стали

карбидообразующими элементами в ее структуре образуются включения карбидов. При избытке карбидообразующих элементов по отношению к углероду эти элементы входят в твердый раствор. В качестве карбидообразующих элементов часто применяют хром, вольфрам, ванадий, молибден, титан, ниобий. Карбидные включения упрочняют сталь и повышают ее твердость.

Для маркировки легированных сталей принята стандартная буквенно-цифровая система. Каждый легирующий элемент обозначается прописной буквой:

марганец—Г	вольфрам—В	ниобий—Б
кремний—С	ванадий—Ф	кобальт—К
хром—Х	титан—Т	бор—Р
никель—Н	алюминий—Ю	фосфор—П
молибден—М	медь—Д	цирконий—Ц

Цифры, следующие за буквой, указывают примерное содержание легирующих элементов в процентах. Если в стали содержится менее 1% легирующего элемента, то цифра не ставится. Двухзначное число в начале марки обозначает содержание углерода в сотых долях процента; однозначное число в начале марки, принятое в обозначениях марок высоколегированных конструкционных сталей и инструментальных сталей, — содержание углерода в десятых долях процента. При содержании в высоколегированных сталях менее 0,1% в начале марки ставится цифра 0. В обозначениях марок многих инструментальных сталей, содержащих около 1% или более углерода, цифр перед маркой не ставят.

Так теплоустойчивая сталь, содержащая около 0,12% углерода, 1,1% хрома, 0,3% молибдена и 0,2% ванадия, обозначается 12Х1МФ.

Эта система позволяет по марке стали судить о ее составе и свойствах.

Кроме стандартной маркировки легированных сталей, распространена маркировка завода «Электросталь». Опытные и не стандартизованные стали маркируют буквами ЭИ и ЭП (электросталь исследовательской или поисковой плавки) и порядковым номером. Например, сталь 4Х14Н14В2М маркируется также ЭИ69.

Низколегированные стали для теплообменных аппаратов, содержащие

малое количество легирующих элементов, имеют такую же структуру, как малоуглеродистые стали: феррит с перлитом, однако перлит отличается по структуре от перлита обычных малоуглеродистых сталей. Такие стали относятся к перлитному классу, их аустенит не очень устойчив, и при охлаждении на воздухе распадается с образованием феррито-карбидной смеси — перлита. Примером могут служить стали 15ХМ, 12МХ и 12Х1МФ. Твердый раствор углерода и легирующих элементов в γ -железе с границентрированной решеткой называется аустенитом. Стали, в которых под влиянием легирующих элементов (Ni, Mn) структура аустенита устойчива и при комнатной температуре, относятся к аустенитному классу. Они хорошо противостоят коррозии, немагнитны, хуже проводят тепло, чем углеродистые стали, и имеют большой коэффициент линейного расширения, что нужно учитывать при сопряжении деталей из сталей перлитного и аустенитного классов. Пример сталей аустенитного класса: 1Х18Н12Т, 1Х14Н14В2М.

Стали с большим содержанием хрома (более 12%) при очень малом содержании углерода, в отличие от углеродистых и низколегированных сталей, при нагреве вплоть до температуры плавления не изменяют своей ферритной структуры, так как хром делает устойчивой объемноцентрированную решетку α -железа.

Такие стали относятся к ферритному классу. Примеры сталей этого класса, применяемых в теплообменных аппаратах, — 0Х13, Х28.

Для теплообменных аппаратов применяют стали, содержащие различные легирующие элементы.

Хром повышает предел прочности и текучести и повышает устойчивость стали против коррозии. Содержание более 12% хрома делает сталь нержавеющей. Хром способствует повышению прокаливаемости низколегированной стали, однако придает ей склонность к образованию трещин в сварных швах. При сварке требуются предварительный подогрев и последующая термическая обработка для получения стабильной структуры. Стали с содержанием хрома более 12% и очень малым содержанием углерода относятся к ферритному классу, т. е. сохраняют структуру легированного феррита при температурах от комнатной до температуры плавления. Перекри-

сталлизации с целью измельчения зерна они подвергнуты быть не могут. Эти стали работают в условиях очень высоких температур, когда наблюдается интенсивный рост зерна, в результате чего снижаются пластичность и способность воспринимать динамические нагрузки. Первоначальные механические свойства их путем термической обработки восстановлены быть не могут. Стали ферритного класса не могут быть закалены на мартенсит. В качестве примера можно привести сталь Х28, применяемую для подвесок труб, работающих в среде топочных газов при температурах до 1200°С.

Молибден эффективно повышает прочность стали при высоких температурах и обычно применяется для легирования жаропрочных сталей совместно с хромом. Жаростойкости молибден не повышает. В сталях перлитного класса молибден содержится в количестве 0,20—0,60%.

Никель применяют для легирования сталей в целях повышения жаропрочности. Для этого его добавляют в количестве 9—20%, обычно совместно с хромом.

Ванадий способствует повышению прочности в условиях длительной эксплуатации при высоких температурах. Он измельчает зерно стали и образует очень устойчивые карбиды. Присадка ванадия в количестве более 0,2—0,4% снижает жаростойкость.

Алюминий и кремний обычно добавляют совместно или раздельно для повышения жаростойкости хромистых сталей. На поверхности детали в этом случае образуется очень прочная пленка сложного окисла, обладающая хорошими защитными свойствами.

Титан и ниобий, очень интенсивные карбидообразователи, вводят в сталь в тех случаях, когда требуется связать весь углерод в устойчивые карбиды для ослабления интеркристаллитной коррозии. Для этого следует выдерживать соотношения: Nb : C = 8 : 1; Ti : C = 4 : 1. Добавка титана или ниобия резко снижает склонность малоуглеродистых сталей к подкалке, так как связывание углерода в устойчивые карбиды приводит к понижению содержания углерода в аустените. Избыточное содержание титана и ниобия приводят к образованию интерметаллических соединений и как следствие к хрупкости стали.

Бор вводят в сталь в очень небольшом количестве для повышения прочности при высоких температурах. Присадка бора ухудшает свариваемость сталей.

В химическом машиностроении применяют стали новых марок с повышенным содержанием марганца — 09Г2, 10Г2, 14Г2, 19Г и другие малоуглеродистые стали. Новые марганцовистые стали характеризуются более высоким пределом прочности и текучести (на 15—20%), чем углеродистые стали, что позволяет снизить вес оборудования, а также хорошей свариваемостью, удовлетворительной пластичностью и малой чувствительностью к надрезам, наклепу и старению. Эти

Сравнительная стоимость сталей

Марка стали	15	15М	15ХСМ	15ХЗМ	15Х5СМ	15Х8М	1Х18Н9	1Х18Н9Т	Х25Н20
Сравнительная стоимость	1	1,5	1,9	2,6	3,5	3,9	11,3	13,2	22,5

стали необходимо применять при производстве теплообменных аппаратов.

Механические свойства легированных сталей выше свойств углеродистых сталей, однако они требуют более точного соблюдения технологии и режима термической обработки и дороже обычных углеродистых сталей.

Если принять стоимость качественной углеродистой стали марки 15 за единицу, то стоимость стали 15М составит 1,5, стали 15Х5СМ — 3,5, а стали 1Х18Н9Т — 13,2. Подробные сведения даны в табл. 2-5.

На механические свойства стали большое влияние оказывает величина ее зерна. Как правило, при температурах не выше 350°С стали с мелкозернистой структурой имеют лучший комплекс механических свойств, чем крупнозернистая сталь того же химического состава. Все легирующие элементы, кроме марганца, способствуют измельчению зерна.

Легированные стали подвержены образованию в них специфических дефектов. В частности, стали, легированные хромом, никелем и марганцем, склонны к образованию флокенов — очень тонких и острых трещин, имеющих блестящую серебристую поверхность. Встречаются флокены только в пластически деформированной стали. В случае образования флокенов металл перековывают или перекатывают на меньший размер. При этом флокены завариваются.

Большое влияние на свойства сталей и сплавов, особенно высоколегированных, оказывают растворенные в них газы.

Кислород, растворенный в стали, приводит к хрупкости металла в горячем состоянии, сталь плохо куется и прокатывается, дает трещины. Растворенный азот несколько повышает прочность и износостойкость, но резко снижает пластичность и ударную вязкость стали при обычных температурах.

Растворенные газы сильно влияют на прочность высоколегированных сталей и сплавов при высоких температурах. Например, прочность сплава М252 (18% Cr, 10% Mo, 9,5% Co, 1% Al, 2,5% Ti, 0,001% В, остальное Ni), предназначенного для работы при 800—900°С, снижается на 40%, если он выплавлен не в вакууме.

На механические свойства углеродистых сталей растворенные газы влияют в меньшей степени. Вообще, чем выше легирована сталь, тем тщательнее нужно выдерживать технологические режимы выплавки, разливки и обра-

ботки давлением, а также термической обработки.

При одном и том же химическом составе более высокими механическими свойствами обладает сталь, выплавленная в электропечах. Однако этот дорогой способ применяют главным образом для выплавки высоколегированных сталей.

Химический состав и механические свойства проката из низколегированных сталей должны отвечать требованиям ГОСТ 4543—61. По этому стандарту все легированные стали делятся на качественные и высококачественные в зависимости от допустимого содержания серы, фосфора, меди и никеля. Ограничения на содержание этих элементов действительны тогда, когда они не вводятся в сталь в качестве легирующих примесей. В конце обозначения марки высококачественной стали ставится буква А, например 38ХМЮА.

Свойства низколегированных строительных сталей повышенной прочности приведены в ГОСТ 2058-57, а жаропрочных сталей 16М, 15ХМ, 12МХ, 12Х1МФ и 15Х1М1Ф в ЧМТУ 2579-54 и 2580-54.

Отливки из легированной стали должны соответствовать требованиям ГОСТ 2176-57, в котором указаны химический состав, механические свойства и режим термической обработки отливок.

2-10. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ

Температура оказывает очень сильное влияние на механические свойства стали, определяемые при кратковременных испытаниях, например, растяжением.

С повышением температуры малоуглеродистых сталей изменяется характер кривых растяжения. При комнатной температуре на кривой наблюдается отчетливо выраженная площадка текучести; с повышением тем-

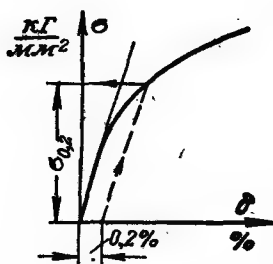


Рис. 2-4. Схема определения условного предела текучести.

пературы она становится меньше и около 300° С исчезает. При отсутствии площадки текучести определяют условный предел текучести — напряжение, вызвавшее остаточную деформацию 0,2% (рис. 2-4). Так же определяют предел текучести сталей аустенитного класса, на кривых растяжения которых нет площадки текучести и при комнатной температуре.

На рис. 2-5 показано изменение свойств малоуглеродистой стали (0,20% С) в интервале температур от 20 до 600° С. В интервале так называемой синеломкости (200—300° С) повышается прочность и снижается пластичность стали, поэтому следует избегать пластического деформирования малоуглеродистой стали в этом интервале температур. Синеломкость обусловлена выделением мелкодисперсных частиц.

Малоуглеродистая сталь после холодного пластического деформирования становится прочнее после дли-

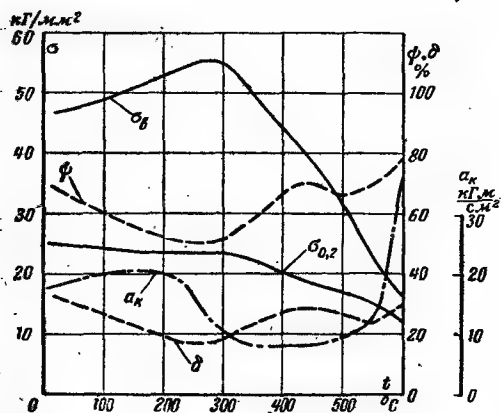


Рис. 2-5. Механические свойства листовой углеродистой стали при температурах от 20 до 600° С (состав стали: 0,20% С; 0,55% Мп; 0,28% Si; 0,028% S; 0,033% P).

тельного пребывания даже при комнатной температуре. Одновременно снижаются ее пластичность и ударная вязкость. Этот процесс называется естественным старением. Нагрев наклепанной стали до 250—300° С — искусственное старение — резко ускоряет процесс. Ударная вязкость может снизиться при этом до 10—40% исходной ее величины. Особенно резко эффект старения проявляется, когда степень пластической деформации составляет 3—10%. Такие деформации имеют место при гибке, клепке, вальцовке. Старение — одна из причин образования трещин в вальцовочных соединениях из малоуглеродистой кипящей стали.

Старение наклепанной стали обусловлено ускоренным распадом пересыщенных растворов углерода и азота в феррите с образованием мелкодисперсных карбидов и нитридов. Распад происходит ускоренно потому, что наклеп вызывает искажение кристаллической решетки и снижение растворимости. При комнатной температуре процесс старения затягивается из-за малой скорости диффузии.

Борьба со старением заключается главным образом в раскислении стали алюминием, образующим очень устойчивые, нерастворимые в железе нитриды, что устраняет возможность перехода их в пересыщенный раствор. Аналогичное влияние оказывают титан, ванадий и цирконий.

Процесс старения предотвращает закалка или нормализация с отпуском при температуре 600—650° С, при которой выделившиеся нитриды и карбиды коагулируют в крупные включения, мало снижающие ударную вязкость.

Повышенное содержание углерода уменьшает склонность к старению, поэтому не следует применять стали с очень низким содержанием углерода. Для изготовления сосудов, работающих под давлением, обычно применяют сталь с содержанием углерода 0,15—0,25%.

Стали, не склонные к старению, не имеют такого максимума на кривой изменения предела прочности в зависимости от температуры, как на рис. 2-5.

В границах синеломкости наблюдается особенно резкое снижение относительного поперечного сужения. Модуль упругости всех сталей с повышением температуры снижается.

На результаты испытаний при высоких температурах влияет скорость деформации. Так, при испытании растяжением углеродистой стали, изменяя длительность испытания в пределах от 5 до 30 мин в интервале температур 400—500° С, при которых начинается сказываться явление ползучести металла, можно получить величины предела текучести, отличающиеся на 1,5—2 кг/м².

2-11. ПОЛЗУЧЕСТЬ И ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ

Ползучесть есть свойство металла, нагруженного при постоянной высокой температуре, медленно и непрерывно пластически деформироваться при неизменных напряжениях.

Повышение температуры и напряжения приводят к увеличению скорости ползучести. В углеродистой стали ползучесть заметна при температурах выше 350—400° С. Ползучесть протекает и в условиях, когда напряжение и температура не остаются постоянными во времени. В таких условиях работают многие детали теплообменных аппаратов. Характеристики же процесса ползучести определяют обычно при постоянных температуре и напряжении.

В результате развития процесса ползучести увеличивается диаметр и уменьшается толщина стенок труб и сосудов. Деталь, проработавшая определенное время в условиях ползучести, разрушается при пластической деформации, во много раз меньшей, чем при разрушении от кратковременной перегрузки при той же температуре.

Повышение рабочих температур в теплообменных аппаратах привело к тому, что большое количество деталей работает в области температур, при которых проявляется процесс ползучести.

Для определения сопротивляемости стали ползучести образец устанавливают в захваты машины (рис. 2-6) и помещают в печь, где поддерживается постоянная температура. Для этого обычно используют схемы с автоматическими регулирующими электронными потенциометрами серий ЭПП и ЭПД (с классом точности 0,5) с датчиком от термопары.

Образец, помещенный в захваты машины, при высокой температуре под действием на-

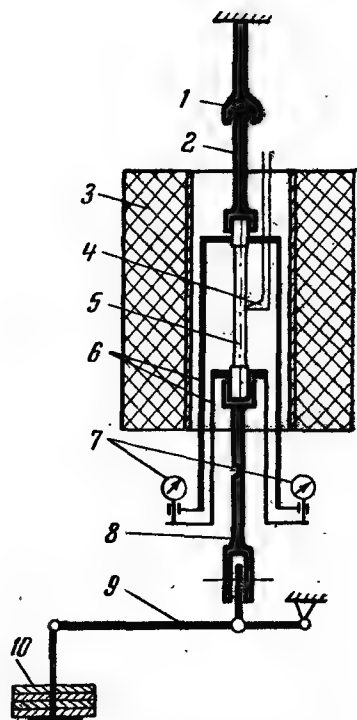


Рис. 2-6. Схема установки для испытания металлов на ползучесть.

1—шаровая опора; 2—верхний захват; 3—электропечь; 4—термопара; 5—образец; 6—тяги экстензометра; 7—индикаторы; 8—нижний захват; 9—рычаг; 10—грузы.

грузки деформируется. Деформацию образца измеряют с помощью экстензометров, укрепленных по концам его рабочей части; верхние тяги экстензометра жестко связаны с верхней частью образца. В них за пределами печи закреплены индикаторы — приборы для замера величины деформации. Ножки индикаторов упираются в концы тяг, соединенных жестко с нижней частью образца. При растяжении образца тяги смещаются одна относительно другой на ту же длину, на которую растянулся образец. При установке образцов в захватах машины проводят их центровку, добиваясь одинаковых показаний индикаторов.

По результатам испытаний строят так называемые первичные кривые ползучести в координатах «суммарная деформация — время» (рис. 2-7), на которых различают участки, соответствующие трем стадиям процесса ползучести (кривая I).

Первая стадия (участок OA) характеризует упругую и пластическую деформацию в момент нагружения, а также деформацию с убывающей скоростью — стадия неустановившейся ползучести.

Во второй стадии процесса (участок кривой AB) пластическая де-

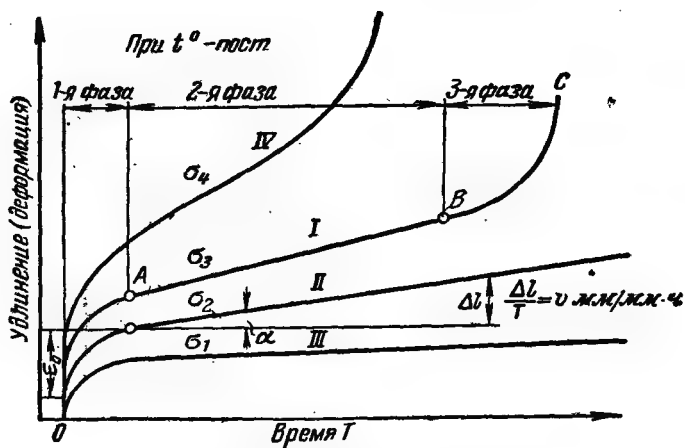


Рис. 2-7. Кривые ползучести стали при постоянной температуре и при различных напряжениях.

формация нарастает с постоянной скоростью — стадия установившейся ползучести.

Третья стадия процесса (участок BC) — стадия разрушения.

Длительность каждой стадии зависит для данного материала от температуры и напряжения. Иногда ползучесть может протекать в течение весьма длительного времени и практически не достигать третьей стадии (кривая II). При относительно низких температурах могут наблюдаться затухающие процессы ползучести (кривая III). Если напряжения очень велики, то вторая стадия процесса ползучести может отсутствовать (кривая IV).

Сопротивляемость металла ползучести оценивается суммарной деформацией за срок службы и скоростью

ползучести v , определяемой по формуле

$$v = \frac{d\varepsilon}{dt},$$

где ε — относительная деформация;
 t — время.

За предел ползучести принимают напряжение, которое приводит при данной температуре к заданной скорости ползучести во второй стадии процесса. Для стационарных установок обычно допускают скорость ползучести во второй стадии 10^{-7} мм/мм·ч, т. е.

$10^{-5}\%$ /ч. По допускаемым суммарным деформациям рассчитывают обычно детали паровых и газовых турбин, насосов и т. п.

Для большинства деталей теплообменных аппаратов и котлов деформация ползучести не имеет существенного значения, так как по условиям эксплуатации их размеры могут увеличиваться в довольно широких пределах. Поэтому детали теплообменных аппаратов обычно рассчитывают не по пределу ползучести, а по пределу длительной прочности.

Предел длительной прочности — напряжение, приводящее металл к разрушению при данной температуре через определенный промежуток времени. За расчетный срок службы теплообменных аппаратов ча-

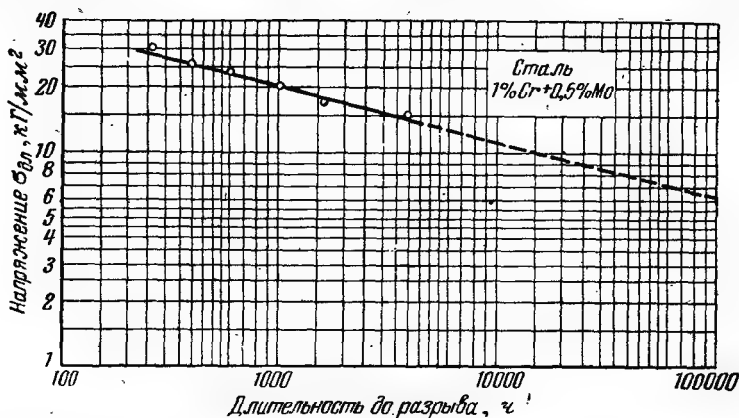


Рис. 2-8. Пример обработки экспериментальных данных в двойных логарифмических координатах при испытаниях стали 15ХМ на длительную прочность.

ще всего принимают 100 тыс. ч. Путем соответствующей обработки экспериментальных данных в двойных логарифмических координатах ограничиваются испытаниями значительно меньшей длительности и путем экстраполяции получают достаточно надежные результаты. На рис. 2-8 приведен пример обработки данных испытания стали 15ХМ при 550° С. Однако экстраполяция при обработке данных в двойных логарифмических координатах не всегда оказывается возможной. Прямая на графике длительной прочности для многих сталей имеет перелом. Он наступает через 1 000 или более часов испытаний. Поэтому для надежной экстраполяции предела длительной прочности на 100 тыс. ч желательно иметь данные испытаний длительностью не менее 4 000—5 000 ч.

При обработке результатов относительно кратковременных испытаний с доведением образцов до разрушения для получения предела длительной прочности при расчетном сроке службы 100 тыс. ч хорошие результаты получаются по методике В. Н. Геминова [Л. 12], согласно которой кривая длительной прочности описывается двумя прямолинейными участками в координатах «напряжение — логарифм времени до разрушения». При этом наклон второго участка в этих координатах меньше, чем наклон первого (рис. 2-9). В полулогарифмической системе координат $\sigma - \lg \tau$ наносят результаты испытаний на длительную прочность продолжительностью от 100 до 1 000 ч. По этим точкам проводят прямую и по двум любым точкам 1 и 2 определяют коэффициент

$$\gamma_1 = 2,3 \frac{\lg \tau_2 - \lg \tau_1}{\sigma_1 - \sigma_2}.$$

Далее находят точку перелома кривой — критическое значение напряжения

$$\sigma_K = \frac{2}{\gamma_1}.$$

Это соотношение справедливо для сталей всех классов. Для сплавов на никелевой основе

$$\sigma_K = \frac{2,5}{\gamma_1}.$$

Первая ветвь прямолинейной зависимости в полулогарифмических координатах может быть продлена до критического напряжения σ_K .

Если точка перелома расположилась левее $\tau = 10^5$ ч, то из нее проводят вторую ветвь прямой с наклоном к оси времени, в 4 раза меньшим, чем наклон первой ветви, а для сплавов на никелевой основе — в 2 раза меньшим.

Чтобы определить предел длительной прочности за 10^5 ч, необходимо провести из точки на оси абсцисс, соответствующей $\tau = 10^5$ ч, перпендикуляр до пересечения с прямой длитель-

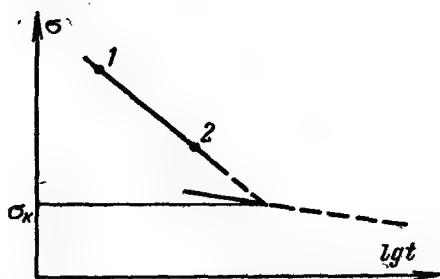


Рис. 2-9. Пример обработки экспериментальных данных в полулогарифмических координатах по методике В. Н. Геминова.

ной прочности и точку пересечения спроектировать на ось ординат.

Прочность металлов определяется межатомными связями внутри самого зерна и силами сцепления, действующими по границам зерен. При низких температурах разрушение происходит путем разрыва связей между атомами в самом кристалле. При высокой температуре менее прочными оказываются границы зерен. Длительность испытания также сильно сказывается на характере разрушения. Чем длительнее испытание при высокой температуре, тем вероятнее межкристаллитный характер разрушения.

Разрушение в условиях длительной работы при высоких температурах подготавливается в течение продолжительного периода. В металле из-за флуктуаций (колебаний) энергии некоторые узлы кристаллической решетки оказываются свободными (свободный узел называется вакансией). Атомы совершают колебательные движения относительно положения равновесия и в зависимости от распределения энергии между ними некоторые из них могут сместиться со своих мест в кристаллической решетке либо в другие узлы, либо в междузлия. Места с неправильным расположением атомов,

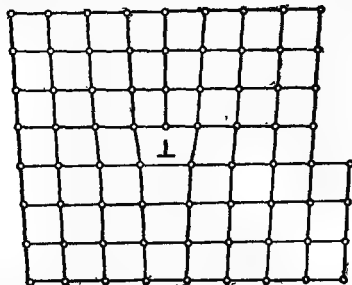


Рис. 2-10. Приближенная картина расположения атомов при наличии дислокации.

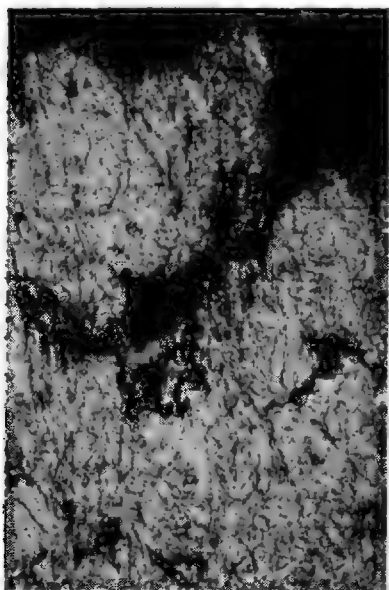


Рис. 2-11. Микроструктура стали 15X1M1Ф в месте разрушения после испытания при 570° С в течение 700 ч, $\times 100$.

когда правильность кристаллической решетки нарушается, называются дислокациями. Пример дислокации показан на рис. 2-10.

Когда к металлу приложено напряжение, вакансии и дислокации начинают перемещаться и образуют скопления около дефектов обработки поверхности, по границам зерен, около микродефектов структуры. Постепенно их становится так много, что образуется микротрещина, которая в дальнейшем служит концентратором напряжений и разрастается, что приводит к разрушению металла. Микроструктура стали 15X1M1Ф около места разрушения показана на рис. 2-11.

Предел длительной прочности в очень большой степени зависит от температуры.

Для случая межкристаллитного разрушения сталей А. В. Станюковичем (ЦКТИ) [Л. 31] установлена следующая аналитическая зависимость предела длительной прочности от температуры:

$$\sigma_{д.п} = Be^{\frac{k}{T}},$$

где $\sigma_{д.п}$ — предел длительной прочности при абсолютной температуре T , кг/мм^2 ;

B и k — коэффициенты;
 e — основание натуральных логарифмов.

Коэффициенты B и k определяют опытным путем, причем коэффициент k практически постоянен в пределах групп сталей аустенитного, ферритного или перлитного класса. По этой формуле, если известен предел прочности при двух температурах, можно определить коэффициенты B и k , а зная их — предел длительной прочности для любой температуры.

Испытания металлов на длительную прочность производят при постоянной температуре. В рабочих же условиях температура часто колеблется в определенных пределах. Эксперименты показали, что при циклическом изменении температуры предел длительной прочности для большинства сталей получается таким же, как при максимальной температуре в цикле. Для никелевых сплавов он несколько выше.

Основной способ увеличения сопротивления ползучести и предела длительной прочности сталей — легирование. Углеродистые стали можно применять при температурах до 450—475° С. При более высоких температурах сопротивление ползучести и длительная прочность углеродистых сталей резко снижаются, и необходимо применение легированных сталей.

Повышение сопротивления ползучести и длительной прочности стали обеспечивают присадки молибдена, вольфрама, ванадия, хрома, бора. Молибден, вольфрам, ванадий и хром образуют очень мелкодисперсные карбиды, препятствующие развитию пластических деформаций при высоких температурах; одновременно они приводят к снижению пластичности при разрушении. Молибден, вольфрам и ванадий, находясь в твердом растворе, повышают температуру рекристаллизации и этим препятствуют разупрочнению при высоких температурах. Стали, легированные только молибденом, не применяют из-за их склонности к графитизации, которая заключается в распаде карбида железа с образованием включений графита.

На скорость графитизации значительное влияние оказывает способ рас-

кисления стали. Сталь, раскисленная алюминием в количестве не более 250 г/т, оказывается стойкой против графитизации. При более высоком расходе алюминия в процессе раскисления способность стали к графитизации усиливается.

Развитию графитизации способствует пластическая деформация: часто графит выпадает по плоскостям скопления.

Если графитизация замечена в ранней стадии, сталь может быть исправлена путем нормализации с высоким отпуском. При нагреве выше точки $A_{с3}$ (температура перехода структуры стали в аустенит) происходит растворение графита; отпуск устраняет подкалку, возможную в процессе нормализации.

Радикальным средством против графитизации является добавка к молибденовой стали 0,5% хрома (например, сталь 12ХМ — молибденовохромистая).

Для повышения окалиностойкости стали необходимо более высокое содержание хрома. Поэтому для поверхностей нагрева, имеющих высокую температуру стенки, применяют сталь 15ХМ (1% Cr), которая может удовлетворительно работать при температурах до 535—540° С. Для работы при более высоких температурах (до 570—580° С) разработана хромомолибденованадиевая сталь 12Х1МФ¹, нашедшая широкое применение в энергомашиностроении.

Из относительно дешевых теплоустойчивых сталей перлитного класса применяют также сталь 15Х1М1Ф; перспективна сталь 12Х2МФСР (с бором), которая по данным лабораторных испытаний жаропрочна при 610° С. Широкого промышленного применения эта сталь пока не получила.

Перечисленные стали применяют для труб котельных установок. В тех случаях, когда сталь работает в контакте с коррозионно-активными средами, в ее состав добавляют больше хрома, вводят кремний и алюминий. Примерами таких сталей служат стали 15ХСМ, 12Х2СМ, 15Х5СМЮ, применяемые в теплообменных аппара-

ратах химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Если необходима только высокая химическая стойкость, применяют высоколегированные стали ферритного класса. Если же необходимо наряду с высокой химической стойкостью обеспечить прочность при высоких температурах, используют стали аустенитного класса.

В последнее время разработаны и проходят промышленное опробование высокохромистые стали с присадкой молибдена и вольфрама, обеспечивающие высокую жаропрочность.

2-12. РЕЛАКСАЦИЯ

Релаксацией называется процесс самопроизвольно затухающего снижения напряжений при постоянной деформации и неизменной температуре.

Снижение напряжений происходит путем перехода упругой деформации ϵ_y в пластическую ϵ_n при постоянной деформации ϵ_n :

$$\epsilon_n = \epsilon_y + \epsilon_p.$$

Примером развития релаксации служит работа шпилек фланцевых соединений. Для обеспечения плотности этих соединений шпилькам придают первоначальный натяг путем затяжки гаек. Однако напряжения в шпильках, вызванные натягом, со временем снижаются, так как упругая деформация переходит в пластическую. Практически ощутимая релаксация развивается в сталях при тех же температурах, что и ползучесть. Релаксационные кривые для стали марки 25Х2МФА, применяемой для шпилек фланцевых соединений при температуре теплоносителя не выше 530° С, представлены на рис. 2-12. Термическая обработка —

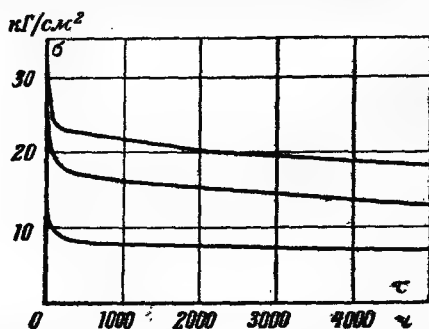


Рис. 2-12. Результаты испытаний на релаксацию стали 25Х2МФА (ЭИ10) при 500° С.

¹ В первых технических условиях обозначалась 12ХМФ.

Области применения легированных сталей для крепежных изделий

Марка стали	ГОСТ	Допускаемая температура, °С	Назначение
35Х, 38ХА и 40Х	4543-61	От -40 до +435	Шпильки, болты
35Х, 38ХА и 40Х	4543-61	От -40 до +480	Гайки
30ХМА	4543-61	От -40 до +480	Шпильки, болты
30ХМА	4543-61	От -40 до +510	Гайки
25Х2МФА	4543-61	От -40 до +530	Шпильки, болты
25Х2МФА	4543-61	От -40 до +560	Гайки
1Х18Н9Т	5632-61 и ТУ	От -196 до +600	Болты, шпильки, гайки
4Х14Н14В2М (ЭИ69)	5632-61 и ТУ	До +600	То же

нормализация с 920°С и отпуск при 650°С в течение 2 ч. Температура испытания 500°С.

Из-за снижения напряжений в шпильках уменьшается удельное давление на прокладку фланцевого соединения и возникает опасность нарушения плотности. Чтобы избежать этого, шпильки по прошествии некоторого времени подтягивают. После каждого последующего подтягивания релаксационная кривая идет все более полого, напряжения в шпильках снижаются не так быстро. Время до последующего подтягивания может быть значительно большим, чем до предыдущего.

В зависимости от температуры среды для шпилек, болтов и гаек допускается применение сталей, указанных в табл. 2-6.

Для устранения заедания резьбового соединения, работающего при высокой температуре, шпильки и гайки должны изготавливаться из разного материала, причем материал гайки должен быть мягче. Поверхность резьбы должна быть возможно более гладкой, для чего ее шлифуют, а иногда азотируют. Хорошие результаты дает применение меднографитовых смазок; обычные машинные масла не используют, так как они способствуют пригоранию поверхностей.

При температуре рабочей среды до 600°С для шпилек применяют сталь 4Х14Н14В2М, а при температуре до 680°С — стали ЭИ612 (ХН35ВТ) и ЭИ726 (1Х14Н18В2Б1Р). Для температур среды выше 650°С применяют также шпильки из сплава на никелевой основе типа нимоник. В условиях коррозионно-активной среды при температурах до 450°С применяют шпиль-

ки, болты и пружины из сталей 3Х13 и 4Х13. Релаксации напряжений подвержены также пружины, работающие при высокой температуре.

Для крепежных деталей аппаратов с температурой теплоносителя до 580°С разработана сталь перлитного класса 20Х1М1Ф1ТР (ЭП182).

2-13. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

При работе некоторых перлитных сталей в интервале температур 400—500°С наблюдается тепловая хрупкость: после длительной выдержки в этом интервале температур резко снижается ударная вязкость; определяемая при комнатной температуре. В результате этого детали плохо переносят ударные нагрузки при ремонте. С тепловой хрупкостью приходится особенно считаться в таких деталях, как болты и шпильки, имеющие острые надрезы и выточки, служащие концентраторами напряжений и поэтому дополнительно снижающие сопротивляемость ударным нагрузкам.

При возникновении тепловой хрупкости ударная вязкость при рабочих температурах остается на достаточно высоком уровне. Показатели пластичности металла — относительное поперечное сужение и относительное удлинение — не изменяются.

Развитие тепловой хрупкости ускоряется при работе деталей под напряжением. Пластическая деформация ускоряет развитие процесса. Развитие тепловой хрупкости зависит от химического состава стали, температуры и времени выдержки. Особенно склонны

к тепловой хрупкости низколегированные хромоникелевые стали (0,5—1,0% хрома, 1—4% никеля), марганцевые (1—2% марганца) и медистые (более 0,4% меди). Эти стали не пригодны для работы в интервале температур тепловой хрупкости. Присадка молибдена задерживает развитие процесса, но не устраняет его полностью.

Тепловой хрупкости подвержены также высоколегированные стали аустенитного класса.

Наименее чувствительны к тепловой хрупкости хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые стали.

Наряду с тепловой хрупкостью в практике эксплуатации стали при температурах 550—650°С приходится наблюдать так называемую отпускную хрупкость. При медленном охлаждении с 550—600°С наблюдается появление хрупкости у некоторых сталей. Природа тепловой и отпускной хрупкости, по-видимому, неодинакова, так как тепловая хрупкость наблюдается часто в сталях, не подверженных отпускной хрупкости.

Отпускной хрупкости подвержены чисто хромистые стали ферритного и полуферритного классов (содержащие 6—25% хрома), хромистые стали с присадкой кремния и алюминия, хромоникелевые и марганцовистые низколегированные стали. После медленного охлаждения с 550—600°С они становятся очень хрупкими. Иногда трубы из такой стали ломаются при ударе или падении. Отпускной хрупкости подвержены и углеродистые стали, но в значительно меньшей степени.

В ходе медленного охлаждения из пересыщенного раствора по границам зерен выпадают очень мелкодисперсные карбиды, обуславливающие снижение ударной вязкости. При ускоренном охлаждении образуется пересыщенный раствор углерода в феррите, и карбидных выделений по границам зерен не наблюдается. Поэтому при ускоренном охлаждении отпускная хрупкость не имеет места.

Присадка 0,2—0,5% молибдена или вольфрама устраняет склонность стали к отпускной хрупкости. Особенно эффективно действует молибден.

В процессе длительной эксплуатации при высоких температурах структура стали претерпевает изменения.

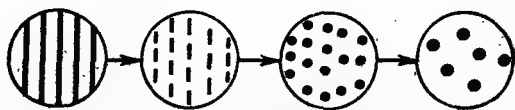


Рис. 2-13. Схема превращения пластинчатого перлита в зернистый.

При температурах 450—580°С пластинки перлита принимают сферическую форму — или приближаются к ней.

Процесс сфероидизации перлита начинается с деления пластинок цементита на отдельные частицы, которые в дальнейшем принимают сферическую форму. Схематически процесс сфероидизации показан на рис. 2-13. Процесс может протекать с образованием путем коагуляции более крупных сферических частиц из мелких частиц той же формы. Карбиды основных легирующих элементов — молибдена, хрома и ванадия — более устойчивы против сфероидизации, чем цементит. Алюминий сильно способствует сфероидизации.

Наибольшее влияние на скорость сфероидизации оказывает температура. Между временем полной сфероидизации пластинчатого перлита и абсолютной температурой экспериментальным путем найдена следующая зависимость:

$$\tau = Ae^{\frac{b}{T}};$$

здесь τ — время полной сфероидизации, ч;
 T — абсолютная температура металла, °К;

A и b — константы, зависящие от химического состава и состояния стали;

e — основание натуральных логарифмов.

Сфероидизация значительно ускоряет ползучесть стали. На пределе прочности она сказывается меньше, снижая его на 10—15%. Относительное сужение и относительное удлинение, характеризующие пластичность металла, повышаются. На ударной вязкости сфероидизация сказывается обычно мало, однако в тех случаях, когда сфероиды образуются преимущественно по границам зерен, наблюдается значительное снижение ударной вязкости.



Рис. 2-14. Повреждение трубы вследствие кратковременного перегрева.

Механические свойства стали, в которой произошла сфероидизация перлита, могут быть восстановлены путем нормализации или нормализации с отпуском. Такой операции подвергают иногда паропроводы на электростанциях.

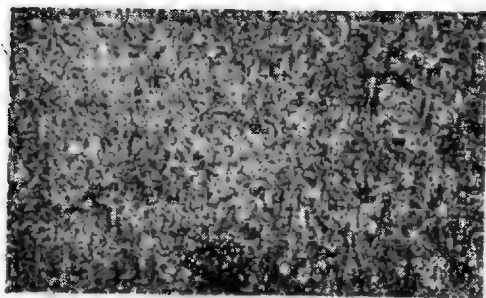


Рис. 2-15. Структура металла трубы из стали 12X1MF, разорвавшейся после кратковременного перегрева; шлиф изготовлен из острой кромки, $\times 100$

В случае разрушения трубы от перегрева обычно имеет место значительное уменьшение толщины кромок в месте разрыва и увеличение периметра трубы в этом месте. Типичный характер повреждения трубы из-за кратковременного перегрева показан на рис. 2-14. Наиболее точно причину разрушения трубы можно установить посредством микроструктурного исследования. В случае перегрева выше A_{c3} на микрошлифе получается структура мартенситного типа (рис. 2-15).

2-14. ТЕПЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ

Тепловой усталостью называется разрушение металла вследствие повторных нагревов и охлаждений.

Разность температур в детали приводит к образованию тепловых напряжений. Так, в нагреваемом стержне наружные слои имеют высокую температуру. Если бы они не были свя-

заны с внутренними слоями, то длина их возросла бы в соответствии с законом линейного расширения металла, однако внутренние, более холодные слои препятствуют такому расширению. В результате этого наружные слои оказываются сжатыми, а внутренние растянутыми. При охлаждении характер напряжений изменяется в обратном порядке.

Тепловые напряжения в отливках из очень хрупких чугунов, стойких в очень агрессивных средах, могут приводить к разрушению деталей. Резкая смена температуры в трубах и сосудах обычно не приводит к образованию трещин, но может привести к разрушению при большом числе нагревов вследствие тепловой усталости.

Чередующиеся нагревы и охлаждения могут иметь место при нестационарном движении охлаждающей жидкости. Например, при периодической подаче в теплообменный аппарат холодного раствора в месте его ввода возникают термические напряжения, которые по мере прогрева раствора исчезают.

Для избежания значительных температурных напряжений в теле толстостенного сосуда при введении холодного теплоносителя применяют способ, показанный на рис. 2-16. В этом случае холодная труба отделена от тела сосуда прослойкой тепловой жидкости.

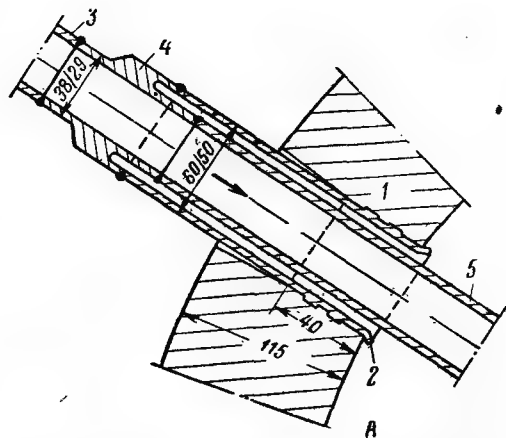


Рис. 2-16. Соединение подводящей трубы с толстостенным корпусом.

1 — корпус; 2 — развальцованная труба; 3 — подводящая труба; 4 — соединительный патрубок; 5 — патрубок защитной рубашки.



Рис. 2-17. Образование кольцевых трещин на внутренней поверхности трубы из-за тепловой усталости.

Температурные напряжения могут возникать при расслоении пароводяной смеси в горизонтальных трубах. Чтобы избежать расслоения, обеспечивают достаточно высокие скорости движения пароводяной смеси.

Трещины, возникающие вследствие тепловой усталости в трубе, могут быть продольными и кольцевыми. Кольцевые трещины на внутренней поверхности трубы показаны на рис. 2-17.

Трещины, возникающие в металле из-за тепловой усталости, чаще всего распространяются по телу зерен, а не по их периферии, что свидетельствует о больших величинах напряжений, вызывающих трещины.

Углеродистые стали менее стойки против тепловой усталости, чем низколегированные стали перлитного класса.

2-15. ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Остаточные напряжения могут возникать в стальных элементах и деталях из-за неравномерного распределения пластической деформации, в частности при развальцовке и гибке труб. Они могут быть вызваны также неравномерной усадкой металла при остывании, как это имеет место в сварных соединениях до термической обработки. Наконец, остаточные напряжения могут быть обусловлены наличием в разных зонах детали различных структурных составляющих. Например, при поверхностной закалке наружные слои детали имеют структуру мартенсита, а сердцевина — феррито-перлитной смеси. Удельный объем мартенсита несколько больше, в результате этого наружные слои сжимаются, а внутренние растягиваются.

Остаточные напряжения, могущие достигать значительной величины, в не-

которых случаях служат причиной коробления и разрушения деталей. Однако в ряде случаев они способствуют повышению прочности деталей. Если остаточные напряжения и напряжения от нагрузки имеют один и тот же знак, то они суммируются, в результате чего прочность детали снижается. Если же остаточные напряжения имеют противоположный знак, то деталь может воспринимать повышенные напряжения от внешней нагрузки без разрушения.

Рассмотрим, как возникают остаточные напряжения в вальцовочном соединении. В тщательно очищенное отверстие трубной доски вставляют с некоторым зазором конус трубы, в который вводят вальцовку, и раздают его (рис. 2-18). Металл трубы выбирают мягче металла трубной доски, поэтому при раздаче металл трубы переходит в пластическое состояние раньше металла доски и заполняет зазор между трубой и доской. В это время металл доски находится еще в упругом состоянии. При снятии внешней нагрузки от вальцовки металл трубной доски стремится возвратиться в первоначальное состояние, но ему препятствует пластически деформированная труба. В результате доска плотно и прочно соединяется с трубой. Остаточные напряже-

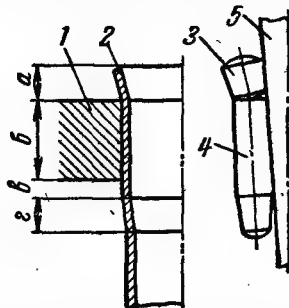


Рис. 2-18. Развальцованная труба с введенными в нее роликом и конусом вальцовки.

1—трубная решетка; 2—труба; 3—бортовочный ролик; 4—ролик вальцовки; 5—конус; а—выступающий отбортованный конец «колокольчик»; б—толщина трубной доски; в—запас развальцовки трубы; г—переход от развальцованного участка к невальцованной части трубы.

ния в данном случае имеют положительное значение.

В сварных соединениях и гиах труб остаточные напряжения иногда способствуют разрушению деталей. При стыковой сварке труб остаточные напряжения часто приводят к образованию кольцевых трещин на их внутренней поверхности.

В тех случаях, когда остаточные напряжения снижают прочность деталей, их стараются устранить путем термической обработки, применяя высокий отпуск углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса, а также нагрев до 1050—1100°С и последующее быстрое охлаждение сталей аустенитного класса.

Методы, применяемые для определения остаточных напряжений в детали, основаны на удалении части металла детали. Если в удаленном металле существовали напряжения, то снятие этих напряжений вызовет деформацию соседних областей металла. По величине этих деформаций можно подсчитать напряжения, существовавшие в детали.

В деталях, работающих при высокой температуре, остаточные напряжения со временем релаксируют. Кафедрой технологии металлов Московского энергетического института была проведена научно-исследовательская работа по исследованию возможности отказа от термической обработки трубопроводов диаметром 273×26 мм из стали 12МХ. Было установлено, что в течение 5500 ч работы при 510°С остаточные напряжения снизились примерно вдвое. Чем ниже релаксационная стойкость стали при рабочей температуре, тем быстрее происходит снятие остаточных напряжений в ходе эксплуатации.

2-16. ВЛИЯНИЕ МИНУСОВЫХ ТЕМПЕРАТУР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

В холодильных установках металл теплообменных аппаратов должен надежно работать при минусовых температурах, обычно не ниже —70°С.

Ударная вязкость углеродистых сталей при температурах ниже нуля резко снижается, сталь становится хрупкой. Одновременно наблюдается

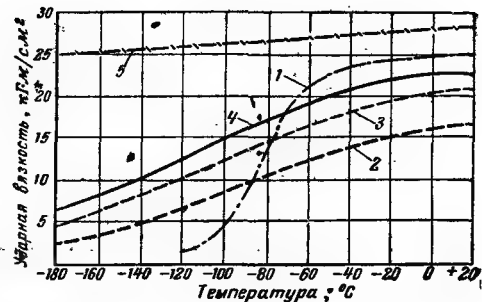


Рис. 2-19. Влияние минусовых температур на ударную вязкость сталей, состав сталей приведен в табл. 2-7.

некоторое повышение предела прочности и предела текучести при снижении относительного удлинения и относительного поперечного сужения. Однако уменьшение этих характеристик происходит не так резко, как снижение ударной вязкости.

На свойства стали при низких температурах существенно влияют химический состав, способ производства и режим термической обработки. Хорошо сопротивляется динамическим нагрузкам при минусовых температурах спокойная мартеновская сталь, раскисленная алюминием (рис. 2-19, кривая 1). Химический состав и режим термической обработки сталей, для которых на рис. 2-19 дана зависимость ударной вязкости от температуры, приведены в табл. 2-7. Мартеновская сталь, раскисленная только ферромарганцем и ферросилицием, проявляет низкую ударную вязкость при более высоких температурах. Наибольшей хрупкостью при низких температурах характеризуются углеродистые стали, выплавленные в конвертерах — бессемеровская и томасовская. По сравнению с мартеновской сталью они со-

Таблица 2-7

Химический состав и режим термической обработки сталей (к рис. 2-19)

Номер кривой на рис. 2-19	Содержание элементов, %						Термическая обработка
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	
1	0,15	—	1,0	—	—	0,3	Нагрев до 950°С, охлаждение на воздухе
2	0,3	0,3	0,6	0,5	1,5	—	Нагрев до 850°С с охлаждением в воде, далее нагрев до 680°С с охлаждением в масле
3	0,15	0,2	0,4	—	5,0	—	Нагрев до 850°С с охлаждением в масле, нагрев до 600°С, охлаждение в масле
4	0,3	0,5	18,0	3,0	—	—	Нагрев до 1050°С, охлаждение в воде
5	0,15	0,4	0,5	18	9,0	—	Нагрев до 1050°С, охлаждение в воде

держат повышенное количество фосфора и растворенных газов: азота и кислорода. При тщательной дегазации стали перед разливкой и при пониженном содержании фосфора конвертерные стали имеют одинаковые свойства с мартеновскими того же химического состава.

Присадка некоторых элементов (особенно никеля и марганца) способствует повышению ударной вязкости сталей в области минусовых температур. Из низколегированных сталей хорошими свойствами обладает сталь, содержащая 2,5% никеля. Введение небольших добавок ванадия и алюминия также способствует повышению ударной вязкости при минусовых температурах. Оптимальная структура — сорбит (получается после закалки с отпуском при 600° С).

Стали ферритного и полуперлитного классов — 0Х13, 1Х13, Х17 и Х25 — не пригодны для работы при низких температурах.

Наиболее высокую ударную вязкость при минусовых температурах сохраняют хромоникелевые стали аустенитного класса, в частности сталь 1Х18Н9. Сравнительные данные о зависимости ударной вязкости различных сталей от температуры приведены на рис. 2-19. Для аустенитных сталей хорошие результаты дает аустенизация с нагревом до 1050° С.

При сварке деталей, предназначенных для работы в области низких температур, следует избегать сильного газонасыщения сварного шва. Такие детали сваривают с применением предварительного и сопутствующего подогрева. Сварной шов, предназначенный для работы при минусовых температурах, подвергают отпуску. Металл шва имеет обычно более низкую ударную вязкость, чем основной металл. Усиление шва лучше удалять шлифовкой, так как оно служит концентратором напряжений и предопределяет хрупкий характер разрушения.

Чугунное литье, как и стальное, приобретает хрупкость при минусовых температурах, однако в меньшей степени.

Исследования цветных металлов и их сплавов показали, что пределы прочности и упругости, твердость и пластичность никеля, меди и алюми-

ния плавно возрастают при снижении температуры до —180° С. Ударная вязкость медных и алюминиевых сплавов с понижением температуры почти не изменяется. Показатели пластичности сварных швов на меди и латуни не только не ухудшаются при снижении температуры, а даже улучшаются, что выгодно отличает эти металлы от стали.

2-17. ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРАХ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

При изготовлении реакторов в качестве материалов используют алюминий, легированные нержавеющие стали аустенитного класса (типа 1Х18Н9 и 1Х18Н9Т) и цирконий. Последний по совокупности физико-химических и технологических свойств является одним из лучших материалов для ядерных энергетических реакторов.

Многие действующие реакторы имеют трубки водяного охлаждения и оболочки тепловыделяющих элементов из алюминия. В случае высоких температур и при применении в качестве теплоносителей жидких металлов алюминий непригоден. Сталь 1Х18Н9Т используется в тех случаях, когда требуются высокая прочность и химическая стойкость при высоких температурах.

Кроме механических и физических свойств металлов, для изготовления реакторов большое значение имеет способность металлов поглощать нейтроны. Наиболее характерным критерием может служить способность труб равной прочности и равного внутреннего диаметра поглощать нейтроны. Такие данные и также температуры плавления некоторых металлов приведены в табл. 2-8.

Таблица 2-8
Характеристики некоторых металлов

Материал	Относительное поглощение нейтронов 1 см ² ×10 ³	Относительное поглощение нейтронов для труб равной прочности при 20° С	Точка плавления, ° С
Магний . . .	3,5	10	650
Алюминий . .	13	102	665
Сталь 1Х18Н9 .	226	234	1 500
Цирконий . . .	12,6	16	1 780

Из данных табл. 2-8 можно видеть преимущество циркония перед алюминием и сталью. Алюминий и магний трудно защищать от коррозии при высоких температурах: с повышением рабочей температуры прочность их быстро падает, так как они обладают низкой температурой плавления, поэтому их нельзя применять в мощных реакторах. Применение нержавеющей сталей и циркония является перспективным для изготовления активной части реакторов с повышенной температурой, однако при применении стали производительность реактора снижается из-за большого поглощения нейтронов.

Применению циркония в первое время препятствовали его высокая стоимость и недостаточная коррозионная стойкость в воде и водяном паре, особенно при температурах выше 400°C . Коррозионную стойкость удалось повысить получением циркония, свободного от вредных примесей (углерода, титана и алюминия), а также легированием циркония элементами, ослабляющими влияние особенно вредных примесей (никелем и железом).

Предел прочности циркония при комнатной температуре составляет $20\text{—}26\text{ кг/мм}^2$, предел текучести $8\text{—}13\text{ кг/мм}^2$, относительное удлинение $36\text{—}48\%$.

Изменение свойств металла в результате облучения вызывается столкновением нейтронов большой энергии или осколков атомов с атомами металла, в результате чего образуются вакансии, дислокации и смещения. В металле вследствие процесса деления атомов или захвата нейтронов ядрами атомов облучаемого металла появляются новые атомы — примеси. Вследствие этих изменений структуры металла его пластичность и ударная вязкость резко снижаются, а предел текучести и твердость повышаются; модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона остаются практически неизменными.

Влияние на свойства металла крупной дозы облучения за короткий промежуток времени не равноценно влиянию такой же дозы, полученной путем длительного облучения; в первом приближении изменение свойств металла можно характеризовать по интегральной дозе. Одной из многих причин та-

кой неравноценности может явиться процесс «отдыха» металла. В дальнейшем условно принято, что свойства металла изменяются в зависимости от суммарного числа нейтронов, прошедших через 1 см^2 поверхности.

Влияния облучения (в количестве $1,5 \cdot 10^{20}\text{ нейтр/см}^2$) на относительное удлинение различных металлов показано в табл. 2-9.

Таблица 2-9

Влияние облучения на пластичность металлов

Материал	Относительное удлинение, %	
	до облучения	после облучения
Алюминий	38	21
Сталь 20	22	5
Сталь 1Х18Н9	49	25
Молибден	4,4	0

С повышением температуры изменение механических свойств в результате облучения сказывается в меньшей степени. По-видимому, с повышением температуры увеличивается подвижность дефектов кристаллической решетки, возникающих при облучении.

Облучение всегда вызывает повышение прочности и снижение пластичности, при этом предел текучести повышается в ходе облучения интенсивнее предела прочности. Так, при облучении стали 1Х18Н9Т в потоке $1 \cdot 10^{20}\text{ нейтр/см}^2$ предел текучести повышается на 283% , а предел прочности на 54% .

С увеличением потока влияние облучения постепенно ослабевает. При величине потока в $10^{19}\text{—}10^{20}\text{ нейтр/см}^2$ достигается относительное насыщение дефектами, и дальнейшее усиление потока практически не сказывается на механических свойствах аустенитных сталей (рис. 2-20).

Влияние облучения на свойства перлитной стали несколько отличается по своему характеру от влияния на свойства аустенитной стали. В начальный период облучения перлитной стали 25ХЗМ, до достижения интегрального потока $2,5 \cdot 10^{19}\text{ нейтр/см}^2$ наблюдается повышение предела прочности и предела текучести при одновременном резком снижении относительного

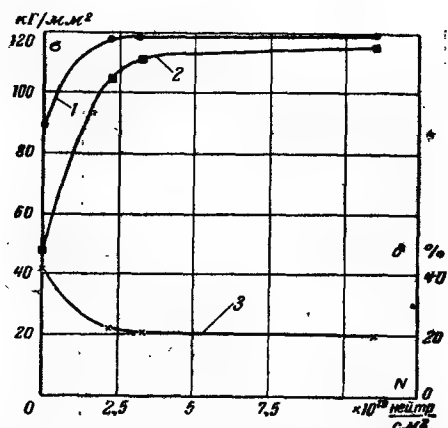


Рис. 2-20. Изменение механических свойств стали X14Ni14M3B в зависимости от интегрального потока нейтронов.

1 — предел прочности; 2 — предел текучести; 3 — относительное удлинение.

удлинения и ударной вязкости (рис. 2-21). Далее снижается как предел прочности, так и предел текучести, причем предел текучести снижается интенсивнее предела прочности. Одновременно снижаются относительное удлинение и ударная вязкость. При этом после облучения интегральным потоком $5 \cdot 10^{19}$ нейтр./см² значение ударной вязкости становится меньше $0,5 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$ — при $6,5 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$ до облучения. Обычно не допускают снижения ударной вязкости стали ниже $5 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$, в очень редких случаях в виде исключения допускают ударную вязкость $3 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$.

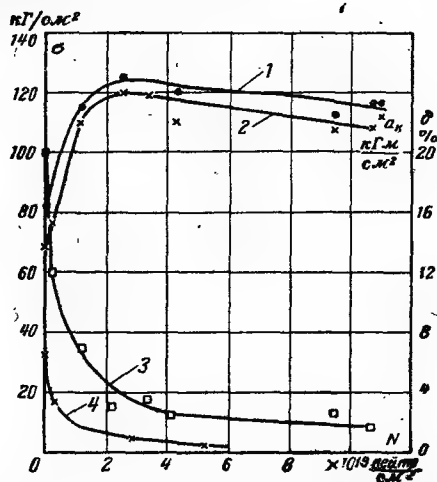


Рис. 2-21. Изменение механических свойств стали 25X3NM в зависимости от интегрального потока нейтронов.

1 — предел прочности; 2 — предел текучести; 3 — относительное удлинение; 4 — ударная вязкость.

Чугуном называется сплав железа с углеродом, содержащий более 2% углерода. Наибольшее распространение получили чугуны с содержанием углерода от 2,8 до 3,5%. Кроме углерода, в чугунах содержатся кремний и марганец, а также вредные примеси — сера и фосфор.

При изготовлении теплообменных аппаратов чугунное литье находит широкое применение: из него выполняют корпус вентилей, задвижек и предохранительных клапанов, тройники, боковые крышки и водяные камеры конденсаторов, корпуса и роторы центробежных насосов, тарелки ректификационных колонн и многие другие детали.

Отливки выполняют обычно из серого чугуна, характеризующегося высокими литейными свойствами: малой усадкой, большой жидкотекучестью, относительно невысокой температурой плавления и очень хорошей обрабатываемостью.

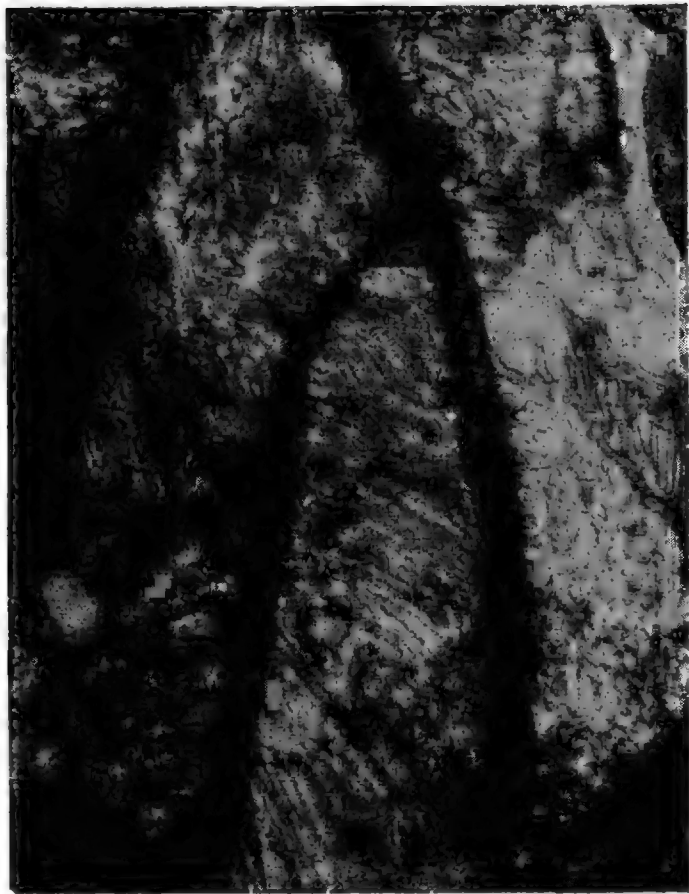
Серый чугун значительно лучше работает на сжатие, чем на растяжение: предел прочности чугуна на сжатие колеблется от 50 до 100 кг/мм^2 . Модуль упругости серых чугунов увеличивается с повышением напряжения. Величина ударной вязкости серого чугуна весьма невелика: $0,1\text{—}0,4 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$.

Прочность серого чугуна определяется его структурой, которая состоит из ферритной (рис. 2-22,а) или перлитной металлической основы (рис. 2-22,б) и включений графита, в обычных чугунах — чешуйчатой (пластинчатой) формы. При оценке механических свойств чугуна чешуйки графита в первом приближении можно рассматривать как пустоты или надрезы.

Путем присадки некоторых элементов даже в очень небольших количествах (сотые доли процента) можно получить модифицированный чугун, имеющий мелкодисперсный графит в перлитной металлической основе. Твердость, прочность и износостойкость чугуна определяются строением металлической основы: перлитный чугун более тверд, более прочен и более износостоек, чем ферритный. Ферритный чугун пригоден только для изготовления неответственных деталей.



a)



б)



а)



б)

Рис. 2-22. Микроструктура чугуна, $\times 100$.
 а — ферритный серый чугун; б — перлитный серый чугун; в — высокопрочный чугун с шаровидным графиком; г — ковкий ферритный чугун.

Чугунные детали хорошо сопротивляются переменным нагрузкам.

Серый чугун служит хорошим материалом для изготовления вкладышей подшипников в тех случаях, когда скорости вращения шейки вала относительно малы, а удельные давления велики. Включения графита служат смазкой; после выработки графита по образовавшимся канавкам масла подается к шейке вала. В результате этого снижается коэффициент трения и повышается износостойкость чугуна.

2-19. МАРКИРОВКА СЕРОГО ЧУГУНА, ОСНОВНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

По ГОСТ 1412-54 серый чугун маркируется по прочности металла в отливке. Обозначения марок серых чугунов начинаются с букв СЧ — серый чугун, далее следуют два двузначных числа, разделенные дефисом (черточкой), показывающие минимальные пределы прочности чугуна в кг/мм^2 соответственно при испытаниях на растяжение и изгиб.

При испытании на изгиб круглый образец диаметром 30 мм укладывают на роликовые опоры с расстоянием между ними 300 или 600 мм

и нагружают посредине. Предел прочности при испытании на изгиб определяют по формуле

$$\sigma_{\text{изг}}^{\text{изг}} = \frac{8Pl}{\pi d^3},$$

где P — сила, разрушившая образец, кг ;
 l — расстояние между опорами, мм ;
 d — диаметр образца, мм .

Основное назначение марок серого чугуна указано в табл. 2-10. Отливки из серого нелегированного чугуна из-за склонности к росту применяют при температурах до 250°C ; модифицированные чугуны — до 300°C . Согласно «Правилам устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» Госгортехнадзора чугунное литье допускается для изготовления сосудов; предназначенных к работе при температуре стенки от -15 до $+250^\circ\text{C}$ и температуре обогревающей среды не выше 650°C . Обогрев пламенем не допускается. Для изготовления сосудов допускается применение чугуна марок не ниже указанных в табл. 2-11.

С целью проверки прочности и плотности чугунных отливок, работающих под внутренним давлением, проводят гидравлическое испытание полуторным рабочим давлением, но не менее 3 атм.

Таблица 2-10

Основное назначение марок серого чугуна

Марка чугуна	Характеристика отливок
СЧ00*	Отливки малой прочности для изделий простой конфигурации: простые стойки и опоры, подкладки, колпачки ректификационных колонн и др.
СЧ12-28	Гарнитура для печей: шиберы, заслонки, задвижки, дверцы; наружные решетки для конвекционных секций, тарелки ректификационных колонн
СЧ15-32	Трубы конденсаторов низкого давления, переходы к ним, двойники, конденсационные горшки, арматура и фитинги низкого давления ($P_y = 10 \text{ кг/см}^2$)
СЧ18-36	Для элементов, изготавливаемых из СЧ15-32, а также шкивы, балансиры, коробки редукторов
СЧ21-40	Корпуса задвижек и клапанов, работающих под средним давлением, колеса центробежных насосов, втулки, цилиндры и клапаны поршневых насосов, литье для компрессоров
СЧ28-48 СЧ32-52	Ответственное литье для компрессоров и насосов, работающих под давлением, корпуса и цилиндры паровых насосов, шестерни
СЧ35-56 СЧ38-60	Особо ответственное литье для элементов насосов и компрессоров высокого давления

* В чугуне этой марки не гарантируются определенные механические свойства. Испытания прочности чугуна не проводят.

Таблица 2-11

Области применения серого чугуна различных марок

Марка чугуна по ГОСТ 1412-54, не ниже	Рабочее давление, не более кг/см^2	Допустимый максимальный внутренний диаметр сосуда, мм	Назначение
СЧ15-32	6	1 000	Для внутреннего давления
СЧ15-32	3	2 000	То же
СЧ18-36	3	3 000	" "
СЧ18-36	8	2 000	Для наружного давления

2-20. ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЧУГУН

Прочность чугуна определяется размером и формой включений графита, а также строением металлической основы: при равном числе и одинаковых размерах включений графита чугун с перлитной металлической основой прочнее чугуна с ферритной основой. Чем компактнее и мельче включения графита, тем выше прочность чугуна.

Присадка к чугуну в ковш перед разливкой в формы магнезия дает возможность получить шаровидные включения графита. Магний в жидком чугуне кипит и горит ярким пламенем, при этом выделяется большое количество белого дыма, а в ковше происходит интенсивное перемешивание металла. Обычно в ковш добавляют 0,4—0,6% магнезия от веса чугуна; большая часть магнезия выгорает, и в металле остается всего 0,04—0,06% магнезия.

Микроструктура высокопрочного чугуна с шаровидным графитом показана на рис. 2-22,в, где отчетливо видны шаровидные включения графита, окруженные небольшими светлыми участками феррита. Вокруг феррита располагается перлит.

Шаровидные включения графита в меньшей степени, чем включения любой другой формы, ослабляют металлическую основу, и прочность чугуна получается высокой. При шаровидной форме графита серый чугун обладает пластичностью и ударной вязкостью более высокой, чем у лучших перлитных чугунов с чешуйчатым графитом.

Марки и механические свойства высокопрочного чугуна приведены в табл. 2-12.

Обозначение марок высокопрочного чугуна по ГОСТ 7293-54 начинается

Таблица 2-12

Механические свойства высокопрочного чугуна

Марка чугуна	Предел проч- ности при рас- тяжении, кг/мм ²	Предел теку- чести при растяжении, кг/мм ²	Удли- нение, %	Ударная вязкость, кг·м/см ²	Твердость по Бринел- лю, кг/мм ²
	не менее				
ВЧ45-0	45	36	—	—	187—255
ВЧ50-1,5	50	38	1,5	1,5	187—255
ВЧ60-2	60	42	2,0	1,5	197—269
ВЧ45-5	45	33	5,0	2,0	170—207
ВЧ40-10	40	30	10,0	3,0	156—197

ся с букв ВЧ — высокопрочный чугун. Первое число в марке — минимальное значение предела прочности при растяжении в кг/мм^2 , второе — минимальное значение относительного удлинения в процентах.

Высокопрочный чугун соединяет в себе высокие механические свойства стали и технологические качества серого чугуна. Литейные свойства его высоки, он легко обрабатывается резанием. Скорость роста высокопрочного чугуна в несколько раз меньше скорости роста серого чугуна.

2-21. КОВКИЙ ЧУГУН

Обычный серый чугун с пластинчатым графитом характеризуется низкой ударной вязкостью. В связи с этим недостатком серого чугуна широким распространением пользуются так называемые ковкие чугуны, отличающиеся высокой ударной вязкостью и пластичностью.

Отливки для изготовления деталей ковкого чугуна отливают из белого чугуна с низким содержанием кремния (0,5—1,2%), марганца (не более 0,5—0,6%) и углерода (2,1—3,1%). Малое содержание кремния обеспечивает отсутствие пластинчатых включений графита в структуре. Отливки подвергают затем длительному отжигу, график которого приведен на рис. 2-23.

При отжиге отливок из белого чугуна их медленно нагревают до 900—950°С в открытой печи или в ящиках с песком. В процессе выдержки при этой температуре происходит распад ледебуритного цементита на графит и аустенит. При этом включения графита получают хлопьевидной формы, что сообщает чугуну высокую пластичность и ударную вязкость. Такой графит называется углеродом отжига. Если весь ледебуритный цементит распался, получается структура из аустенита и углерода отжига. Непрерывное и относительно

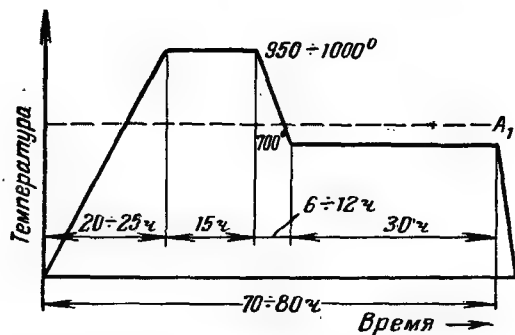


Рис. 2-23. График отжига белого чугуна для получения ферритного ковкого чугуна.

быстрое охлаждение до комнатной температуры дает структуру, содержащую перлит и углерод отжига. Если вблизи от нижней критической точки A_1 (около 720°C) охлаждение производить очень медленно ($3\text{--}5^\circ\text{C/ч}$) или дать выдержку при температуре $700\text{--}720^\circ\text{C}$, то начнет разлагаться и цементит перлита, образовавшегося из аустенита при переходе через критическую точку. Продукты разложения перлита — феррит и углерод отжига. Следовательно, ферритный ковкий чугун получается при медленном охлаждении или выдержке при температуре ниже 720°C . Опуская эту выдержку, т. е. не разлагая цементит перлита, можно получить ковкий чугун со структурой, состоящей из перлита и углерода отжига — перлитный ковкий чугун — более дешевый, но менее пластичный, чем ферритный.

Ковкий чугун применяют для изготовления корпусов вентилях, кранов, задвижек малых размеров, а также фитингов диаметром до $1\frac{1}{2}''$ включительно. Он представляет собой хороший заменитель стального фасонного литья, технология изготовления которого сложна.

Обозначение марок ковкого чугуна по ГОСТ 1215-59 начинается с букв КЧ — ковкий чугун. За ними двузначное число, показывающее минималь-

Таблица 2-13

Механические свойства ковкого чугуна

Марка чугуна	Предел прочности, кг/мм^2	Удлинение, %	Твердость по Бринеллю, кг/мм^2
	не менее	не менее	не менее
КЧ37-12	37	12	163
КЧ35-10	35	10	163
КЧ33-8	33	8	163
КЧ30-6	30	6	163
КЧ63-2	63	2	269
КЧ60-3	60	3	269
КЧ56-4	56	4	269
КЧ50-4	50	4	241
КЧ45-6	45	6	241

ное значение предела прочности на растяжение в кг/мм^2 , а далее через дефис — минимальное значение относительного удлинения в процентах. Например, чугун КЧ37-12 имеет предел прочности при растяжении не менее 37 кг/мм^2 , относительное удлинение не менее 12%. Основные показатели механических свойств ковких чугунов приведены в табл. 2-13.

2-22. ЛЕГИРОВАННЫЙ ЧУГУН

Легированные чугуны содержат добавки легирующих элементов, придающие чугунам различные свойства.

Легированные чугуны применяют для работы в коррозионно-активных средах.

Фитинги, запорная арматура и корпуса насосов для перекачки растворов серной кислоты любой концентрации и температуры до кипения, а также для изготовления деталей, работающих в контакте с растворами соляной кислоты крепостью до 1%, изготавливают из кремнистого чугуна — ферросилида по ГОСТ 203-41.

При работе в среде холодных и горячих растворов соляной кислоты применяют антихлор — чугун, поставляемый по тому же ГОСТ 203-41. Химический состав ферросилида и антихлора приведен в табл. 2-14.

Таблица 2-14

Химический состав ферросилида и антихлора

Марка чугуна	Содержание элементов, %		
	Углерод	Кремний	Молибден
Ферросилид	0,45—0,7	14,5—16,0	—
Антихлор	0,5—0,6	15,0—16,0	3,5—4,0

Хромоникелемедистые чугуны с содержанием 4% хрома, 14% никеля и 6% меди применяют для труб конденсаторов, соприкасающихся с хлористым водородом, серной кислотой и сероводородом, а также с каустической содой (едким натром).

Особенно высокой химической стойкостью обладают высокохромистые чугуны Х23, Х28 и Х34. Двузначное число, следующее за буквой Х, указывает содержание хрома в процентах. Эти чугуны не окисляются и не корродируют при температуре до 1000°C . Их

применяют для изготовления элементов печей, соприкасающихся с горячими топочными газами, фитингов, корпусов вентиля и задвижек, корпусов насосов, работающих в среде фосфорной кислоты. Чугуны Х23, Х28 и Х34 используют также в тех случаях, когда требуется повышенная износостойкость при температурах до 550°С.

2-23. ДЕФЕКТЫ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

В некоторых случаях дефекты чугунных отливок могут быть исправлены путем сварки. Сварка чугуна представляет большие трудности по сравнению со сваркой стали. Из-за низкой пластичности чугуна в процессе охлаждения наплавленного металла возникают трещины. При быстром охлаждении наплавленного металла также получается отбеленный чугун, очень твердый и не поддающийся механической обработке. Большое количество графита, легко соединяющегося с кислородом в процессе сварки, приводит к пористости шва.

Разработан ряд технологических приемов, обеспечивающих возможность исправления дефектов чугунного литья сваркой.

Сварку можно проводить с подогревом исправляемой отливки или без подогрева. При сварке без подогрева используют чугунные толстообмазанные электроды, стальные малоуглеродистые электроды со стабилизирующими обмазками, а также электроды из меди и из монель-металла. Чтобы увеличить прочность сварного соединения при ремонте толстостенных отливок, в свариваемые кромок ввинчивают шпильки.

При горячей сварке дефект вырубает, место вырубки заформовывают, чтобы предотвратить растрескивание жидкого металла, и деталь нагревают в печи до 600—700°С. Сварку проводят чугунными электродами. Сила тока и диаметр электродов при горячей сварке значительно больше, чем при холодной.

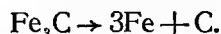
Горячая сварка — весьма совершенный, но дорогой и трудоемкий метод устранения дефектов чугунных отливок.

2-24. РОСТ ЧУГУНА

При высоких температурах эксплуатации получает развитие процесс так называемого роста серого чугуна, т. е. необратимого увеличения его объема, в результате чего искажаются размеры деталей и снижается их прочность.

Явление роста обусловлено несколькими причинами. Одна из этих причин — окисление металла по границам включений графита при эксплуатации чугунных деталей в зоне высоких температур. Кислород тем легче проникает внутрь детали, чем больше число и размеры отдельных чешуек графита.

Вторая причина, обуславливающая рост чугуна, — распад при повышенной температуре цементита с удельным весом 7,6 г/см³ на железос с удельным весом 7,8 г/см³ и графит с удельным весом 2,2 г/см³ по реакции:



В результате распада получаются два продукта, суммарный объем которых больше объема цементита, из которого они образовались.

Третья причина роста чугуна — аллотропическое превращение, которое претерпевают чешуйки графита в чугуне.

Процесс роста чугунных деталей резко ускоряется с повышением температуры, особенно при циклическом изменении температуры.

Характер окружающей атмосферы также влияет на скорость роста чугуна. Так, серый чугун, содержащий 3,48% углерода и 2% кремния, в результате пребывания при 400°С в атмосфере водяного пара в течение 54 недель увеличивается в объеме приблизительно на 3%; предел прочности при растяжении снижается с 12,9 до 7,4 кг/мм².

Для ослабления роста чугуна применяют присадку никеля в количестве 1—2%. Хорошо сопротивляется росту чугун с содержанием около 14% никеля, 6% меди и 4% хрома.

2-25. ОТЛИВКИ И ПРОКАТ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цветные металлы и их сплавы дороже сталей и чугунов, однако их часто используют в качестве материала для теплообменных аппаратов, так как они отличаются более высокой коррозионной стойкостью в условиях эксплуатации и более высокой теплопроводностью.

Широкое применение находят бронзы — сплавы меди с различными элементами: оловом, алюминием, марганцем и др. (кроме цинка).

Обозначения марок бронз начинаются буквами Бр. Далее следуют буквы, соответствующие легирующим элементам бронзы. Цифры указывают содержание этих элементов в процентах. Например, Бр АМц 9-2 содержит

Марки, механические свойства и основное назначение литейных бронз и латуней

Марка сплава	Способ заливки образца	Механические свойства			Основное назначение
		σ_B , кг/мм ²	δ , %	H_B , кг/мм ²	
БрОФ10-1	В землю	22	2	80	Фрикционные и зубчатые колеса. Вкладыши тяжело нагруженных подшипников с уд. давлением до 250 кг/см ² , при обеспечении хорошей смазки и нормальных условий работы (температура не выше 80° С) и другие детали, работающие на трение в этих условиях
	В кокиль	25	3	90	
БрОЦС 6-6-3	В землю	15	6	60	Детали, работающие на трение при уд. давлении до 150 кг/см ² , при обеспечении хорошей смазки и нормальных условий работы (температура не выше 80° С)
	В кокиль	18	4	60	
БрОЦС4-4-17	В землю	15	5	60	Детали, работающие на трение, подшипники и мелкие втулки при уд. давлении ниже 100 кг/см ² при хорошей смазке и нормальных условиях работы
БрОЦСНЗ-7-5-1	В землю	18	8	60	Арматура, работающая в условиях морской или пресной воды, а также паровая арматура, работающая под давлением до 25 атм, и прочие конструкционные детали общего машиностроения
БрАМц9-2	В кокиль	40	20	80	Детали, работающие в слабых растворах серной кислоты, сернокислого алюминия, органических кислот и растворителей
БрАЖ9-4	В кокиль	50	10	120	
БрКМц3-1	В кокиль	35	25	—	
БрАЖН11-6-6	В кокиль	60	2	250	
ЛК80-3Л	В землю	25	10	80	Паровая и водяная арматура, работающая при относительно высоких давлениях. Рабочие колеса, корпуса насосов, клапанные коробки и прочие конструкционные детали общего и специального машиностроения
	В кокиль	30	15	90	
ЛМцА57-3-1	В землю	40	12	60	Ответственные детали специального и общего машиностроения
	В кокиль	50	16	—	

около 9% алюминия и 2% марганца. Наиболее часто применяемые марки бронз приведены в табл. 2-15.

В табл. 2-15 приведены также и наиболее часто применяемые литейные латуни: сплавы меди с цинком.

Обозначение марок латуни начинается с буквы Л. Далее следуют буквы, соответствующие легирующим элементам, кроме цинка. Первое (двузначное) число показывает содержание меди в процентах. Следующие цифры — содержание легирующих элементов

в той последовательности, в какой расположены буквы. Например, ЛМцА 57-3-1 — латунь с содержанием 57% меди, 3% марганца и 1% алюминия, остальное — цинк.

Многие бронзы, в частности оловянистофосфористая бронза БрОФ10-1 и свинцовистая бронза БрС-30, имеют хорошие антифрикционные свойства. Их применяют для изготовления вкладышей подшипников, венцов червячных редукторов и других деталей, работающих в условиях износа.

Таблица 2-16

Механические свойства металла латунных труб

Марка латуни	Предел прочности при растяжении, кг/мм ² не менее	Относительное удлинение, % не менее	Примечание
Л62 Л68 ЛО70-1	30 30 30	38 38 38	Тянутые мягкие
Л62 Л68 ЛО70-1	34 35 35	30 30 30	Тянутые полутвердые
Л62 ЛС59-1 ЛЖМц59-1-1	30 40 44	38 20 28	Трубы пресованные

Алюминиевые бронзы применяют в качестве коррозионно-устойчивого материала для изготовления деталей, соприкасающихся со слабой серной кислотой, сернокислым алюминием, органическими кислотами и растворами солей. Наличие железа и марганца сообщает бронзе повышенные механические свойства и позволяет термически упрочнять ее.

В теплообменных аппаратах для изготовления поверхностей нагрева используют обычно трубы из латуней Л68 и ЛО70-1. Если среда не очень агрессивна, применяют латунь Л68. Латунь ЛО70-1 отличается более высокой коррозионной стойкостью, но она содержит дорогое олово. Латунь Л68 применяют, в частности, для труб поверхностных конденсаторов и бойлеров, работающих на пресной воде. Для конденсаторов, работающих на морской воде, используют латунь ЛО70-1 или латуни с присадкой мышьяка как более стойкие против коррозии. Трубные доски конденсаторов, работающих на морской воде, изготавливают из листовой латуни.

Трубы из латуни марок Л68 и ЛО70-1 для теплообменных аппаратов, а также трубы общего назначения из латуни марок Л62, ЛС59-1 и ЛЖМц-59-1-1 изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ 494-52. Длина труб может быть от 0,5 до 7,5 м. Сортамент латунных труб приводится в ГОСТ 494-52. Трубы могут изготавливаться мяткими — после отжига, снимающего полностью наклеп, полученный в процессе изготовления, и полутвердыми — после низкотемпературного отжига. Механические свойства металла латунных труб приведены в табл. 2-16.

Трубы марок Л68 и ЛО70-1 должны выдерживать испытание гидравлическим давлением 50 кг/см², если между заказчиком и заводом-поставщиком не согласовано другое испытательное давление. По соглашению сторон должны испытываться гидравлическим давлением трубы и других марок.

На трубчатые поверхности нагрева теплообменных аппаратов затрачивается большое количество дорогой латуни, поэтому ведутся работы по созданию ее полноценных заменителей.

Латунным трубам отдается предпочтение перед стальными из-за более высокой коррозионной стойкости в воде.

Отливки из сплавов на никелевой основе находят применение при переработке нефтяных дистиллятов. Один из основных сплавов для такого рода отливок содержит 65% никеля, 29,5% меди, 1,5% железа и 0,9% марганца, 3% кремния и 0,3% углерода. Сплав обладает высокой химической стойкостью. Предел прочности его при комнатной температуре 54 кг/мм², предел текучести 26 кг/мм².

Медноникелевый сплав МН70-30 — мельхиор используют иногда для труб теплофикационных теплообменников. Состав сплава МН70-30 — 70% меди и 30% никеля. Он отличается высокой коррозионной стойкостью.

Сплав свинца с сурьмой применяют для литых элементов, соприкасающихся с растворами серной кислоты концентрации до 60% при малых давлениях.

Если отливка должна быть легкой и иметь хорошие технологические свойства при умеренной прочности, применяют силумины — сплавы алюминия с кремнием. Механические свойства этих сплавов могут быть значительно повышены путем присадки к жидкому металлу смеси из солей хлористого натрия и фтористого натрия в количестве 2—3%. Механические свойства некоторых алюминиевых сплавов приведены в табл. 2-17.

Таблица 2-17

Механические свойства силуминов

Марка сплава	Состояние	Предел прочности, кг/мм^2	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю
АЛ2*	Без термической обработки	15	4	50
АЛ4	Термически обработанный	23	3	65
АЛ9	Закаленный и состаренный	20	2	50

* Модифицированный.

В установках глубокого охлаждения для присоединения манометров и других приборов используют медные трубы. Малая механическая прочность меди не позволяет использовать медные трубы большого диаметра. Следует иметь в виду, что медь подвержена ползучести при комнатной температуре.

Медь отличается очень высокой теплопроводностью и хорошей коррозионной стойкостью во многих средах. Поэтому она находит применение как материал для поверхностей нагрева трубчатых теплообменников. Трубы из меди изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ 617-53 из меди марок М1, М2 и М3 по ГОСТ 859-41.

Сортамент труб из меди приведен в ГОСТ 617-53.

В обозначениях марок меди буква М обозначает названия материала — медь. Цифра, следующая за этой буквой, условно определяет содержание примесей в меди. Например, медь М1 содержит не более 0,1% примесей. Чем больше примесей, тем выше номер марки меди и тем хуже ее теплопроводность. Все примеси в меди снижают ее теплопроводность.

Все большее применение в химической промышленности находят титан и его сплавы. Титан обладает относительно низким удельным весом $4,5 \text{ г/см}^3$. Температура плавления титана 1725°C . Технический титан имеет предел прочности 55 кг/мм^2 , условный предел текучести 43 кг/мм^2 . Он весьма пластичен. Из технического титана прокатывают листы, трубы и сортовой прокат.

Для повышения прочности титана в него добавляют хром, алюминий, ванадий и молибден. Титановый сплав ВТ5, из которого изготавливают поковки, сортовой прокат и трубы, имеет предел прочности 90 кг/мм^2 и условный предел текучести 80 кг/мм^2 , т. е. значительно выше, чем у конструкционной углеродистой стали, применяемой для изготовления теплообменных аппаратов. При нагреве до 400°C предел прочности сплава ВТ5 снижается до 50 кг/мм^2 , предел текучести до 41 кг/мм^2 . Сплав обладает высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах.

Наиболее жаропрочный титановый сплав — ВТ8. Из него изготавливают поковки и штамповки. В сплав ВТ8, кроме титана, входят 3% молибдена и 6,3% алюминия. При температуре 500°C предел прочности сплава ВТ8 составляет 72 кг/мм^2 , а условный предел текучести 57 кг/мм^2 . Стоимость листов из титана и его сплавов выше стоимости листов из нержавеющей стали типа 1Х18Н9Т в 3—4 раза (с учетом разницы в удельных весах).

2.26. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАТУННЫХ ДЕТАЛЕЙ

В процессе эксплуатации часто наблюдается особый вид разрушения латунных труб: растворенный в меди цинк переходит из латуни в теплоноситель, в результате чего отдельные участки трубы или вся ее поверхность превращается в рыхлые кристаллы меди. Иногда этот процесс развивается в виде язвенных образований: «пробки» меди легко выпадают и сплошность трубы нарушается. Латунь ЛО70-1 несколько лучше сопротивляется растворению цинка, чем латунь Л68, поэтому трубы из латуни Л68 применяют для теплообменников, работающих на пресной воде, а трубы из латуни ЛО70-1 — на морской. Иногда для работы в морской воде применяют луженные оловом трубы из латуни Л68.

Нормальный срок службы латунных труб в бойлерах и конденсаторах 20 лет, однако при сплошном слоевом растворении цинка массовый выход из строя труб начинается через 4—6 лет. При образовании пробок выход труб

из строя начинается через 1—2 года, а иногда даже через несколько месяцев.

Добавка к латуни 0,03—0,04% мышьяка сильно замедляет растворение цинка. Высокую коррозионную стойкость приобретает латунь с присадкой 5% никеля.

Латуни склонны также к образованию трещин под действием остаточных напряжений, вызываемых прокаткой или протяжкой, особенно при соприкосновении латуни со щелочами и содой. Поэтому для работы в щелочных средах латунь применять не рекомендуется.

Остаточные напряжения могут быть устранены путем термической обработки — отжига при 200—400°С в течение нескольких часов.

2-27. ПРИПОИ И САЛЬНИКОВЫЕ СПЛАВЫ

Припоем называется любой металл или сплав, который служит для соединения металлических частей в одно целое и имеет температуру плавления ниже, чем металл спаиваемых деталей.

Припой должен обладать способностью диффундировать в соединяемый металл и обеспечивать тем самым необходимую прочность и плотность металла в месте спая.

Припои подразделяются на мягкие — с температурой плавления от 183 до 280°С и твердые — от 600 до 1000°С.

К мягким припоям, обеспечивающим плотность соединений, относятся оловянносвинцовые сплавы с небольшой примесью сурьмы для придания им лучших механических свойств. Маркируются они тремя буквами — ПОС, что означает: припой оловянносвинцовый. За буквами следует число, указывающее содержание олова в процентах. Например, припой ПОС 30 содержит 30% олова. Наибольшее распространение получили припой ПОС 30 и ПОС 40. Припой ПОС 90, как наиболее химически стойкий в органических кислотах, применяется при пайке и лужении теплообменных аппаратов пищевой промышленности.

Твердые припои обеспечивают не только плотность, но и прочность паяных соединений. Химический состав, температура плавления и область применения распространенных твердых припоев приведены в табл. 2-18.

Иногда в теплообменниках, работающих при низких температурах, медные трубы закрепляют в трубных досках заливкой оловом или оловянносвинцовыми сплавами. Такой способ соединения обеспечивает высокую герметичность.

2-28. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Современное развитие химической промышленности и возникновение новых технологических процессов, протекающих в условиях агрессивного воздействия среды на материал аппаратов, а также интенсификация производства предъявляют к конструкционным материалам высокие требова-

Таблица 2-18

Марки, химический состав и основное назначение твердых припоев

Наименование припоев и их марки	Содержание элементов, %			Температура плавления, °С	Область применения
	Серебро	Медь	Цинк		
Медноцинковые ПМЦ36	—	36	Остальное	825	Для паяния латуней марок Л59, ЛС59, а также бронз. Припой хрупкий
ПМЦ48	—	48	То же	833	Припой менее хрупкий, чем предыдущий, для паяния меди, бронзы, латуней и малоуглеродистой стали
ПМЦ54	—	54	То же	870	Для паяния углеродистой стали
Серебряные ПСр10	9,7—10,3	52—54	То же	830	Для паяния стали и цветных сплавов, когда изделия требуют термобработки
ПСр12	11,7—12,3	35—37	То же	785	Для паяния латуней, содержащих меди 58% и более
ПСр25	24,7—25,3	39—41	Остальное	765	Для паяния латуней разных марок

ния в отношении механических свойств и коррозионной стойкости.

Кроме широкого внедрения новых металлических материалов, получили значительное распространение неметаллические материалы.

Только применение неметаллических материалов для изготовления теплообменных аппаратов позволило осуществить такие процессы, как хлорирование, бромирование, производство синтетического спирта.

Неметаллические материалы, используемые при изготовлении теплообменной и химической аппаратуры, должны отличаться высокой химической стойкостью, непроницаемостью для газов и жидкостей, достаточной теплопроводностью, термической устойчивостью, прочностью, небольшим объемом, хорошей сцепляемостью с другими материалами и хорошей обрабатываемостью. Совокупностью этих свойств не обладает, естественно, ни один из неметаллических материалов. Так, большинство из них имеет низкую теплопроводность и может быть использовано только в условиях невысокой температуры и при незначительных ее колебаниях. Поэтому при изготовлении теплообменных аппаратов часто используют несколько видов материалов для удовлетворения техническим требованиям.

Как правило, неметаллические материалы неэлектропроводны и поэтому не подвержены электрохимической коррозии.

Неметаллические материалы имеют как неорганическое, так и органическое происхождение.

К материалам неорганического происхождения относятся: горные породы; искусственные силикатные материалы, получаемые плавлением горных пород (каменное литье, плавленый кварц, стекло, эмаль); керамические материалы, получаемые спеканием; вяжущие силикатные материалы (цементы, бетоны и др.).

К материалам органического происхождения относятся: непластические материалы (древесина, уголь, графит); пластические массы (конденсационные, полимеризационные, асфальтобитумные композиции); вяжущие материалы (арзамиты); материалы на

основе каучука; лакокрасочные материалы.

В ряде случаев применяют комбинированные материалы обеих групп: фаолит, асбовинил, стеклотекстолит и др. Ниже приведена краткая характеристика основных свойств и назначения некоторых неметаллических материалов, применяемых для изготовления теплообменной аппаратуры.

Силикатные материалы

Кварцевое стекло (плавленый кварц). В качестве кислотостойкого материала нашел применение непрозрачный плавленый кварц, отличающийся от прозрачного присутствием в его массе мелких газовых пузырьков. Сырьем для изготовления плавленого кварца служит кварцевый песок высокой чистоты.

Кварцевое стекло отличается высокой термической стойкостью: длительное применение его допустимо при температурах до 1000°C , кратковременное — до $1300\text{--}1400^{\circ}\text{C}$. Изделия из кварцевого стекла, нагретые до $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$, не трескаются при погружении в воду. Теплопроводность кварцевого стекла — $6\text{--}11 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$. Коэффициент его линейного расширения в 6 раз меньше, чем фарфора, и в 12—20 раз меньше, чем простого силикатного стекла. Кварцевое стекло имеет высокую электроизоляционную способность. Оно устойчиво по отношению ко всем минеральным и органическим кислотам любых концентраций (кроме плавиковой и фосфорной кислот). Поэтому во многих случаях им заменяют цветные металлы, а иногда даже серебро и платину.

Высокая вязкость жидкого кварцевого стекла не позволяет получать из него литье сложной формы. Благодаря незначительному коэффициенту линейного расширения кварцевое стекло не растрескивается при механической обработке. При монтаже установок из кварцевого стекла широко применяется соединение узлов деталей при помощи уплотнений и сварки при температуре $1000\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ с помощью специальной горелки и кварцевого присадочного прутка. После сварки необходима термическая обработка для снятия внутренних напряжений.

Из непрозрачного кварцевого стекла изготавливают трубы длиной до 1500 мм при диаметре до 300 мм, аппараты для работы под вакуумом и давлением до 3—4 атм, царги для колонн диаметром до 700 мм и длиной до 1500 мм, S-образные холодильники, футеровочные плиты и другие детали.

Силикатное стекло представляет собой сплав из песка, калцинированной соды, сульфата натрия, поташа и некоторых других компонентов. Теплопроводность стекла невысока—0,65 ккал/м·ч·град, термостойкость—до 300—350°С. Силикатное стекло—коррозионностойкий, но очень хрупкий материал. Из стекла изготавливают трубы, колена, отводы и тройники для агрессивных жидкостей, футеровочные плиты, ткань. Известны случаи изготовления стеклянных ректификационных колонн диаметром 200—250 мм и высотой 2 м, а также стеклянных деталей для центробежных насосов.

Каменно-керамические изделия получают обжигом до спекания (при температуре до 1300°С) различных природных силикатных материалов и присадок, снижающих температуру плавления шихты. Основным сырьем для производства каменно-керамических изделий служат глина, измельченный шамот, полевой шпат и кварцевый песок.

Каменно-керамические изделия имеют высокую химическую стойкость к большинству агрессивных сред, высокую термостойкость и огнеупорность до 1500°С. Пористость их колеблется в пределах от 2 до 35% в зависимости от способа получения изделия; теплопроводность невелика—0,9—3,5 ккал/м·ч·град.

Каменно-керамические детали применяют при изготовлении керамических башен, колонн, труб, кранов, насосов и вентиляторов для агрессивных жидкостей и газов, а также толстостенных баллонов для перевозки и хранения жидкостей. Большое распространение получили теплообменные керамические аппараты для химической промышленности: холодильники, конденсаторы и подогреватели.

Фарфоровые изделия, относящиеся к группе тонкокерамических,

характеризуются спекшимся тонким черепком, просвечивающим в тонких слоях и не проникаемым для воды и газов (пористость < 0,1%), теплопроводность фарфора—0,25 ккал/м·ч·град. Применяемый в химической промышленности твердый фарфор получают обжигом при 1300—1450°С смеси глины (до 55%), кварца (до 30%) и полевого шпата (до 30%).

Лабораторный фосфор отличается высокой термостойкостью: он выдерживает резкие смены температуры в пределах 20—1000°С.

Из фарфора изготавливают футеровочные плиты, насадки башен, варочные котлы, травильные ванны, вакуум-аппараты, трубы, змеевики, краны и даже насосы. Аппаратура из фарфора применяется там, где требуется особая чистота продукции.

Углеграфитовые материалы

Вследствие высокой химической стойкости и хорошей теплопроводности уголь и графит получили распространение в качестве материалов для изготовления теплообменных аппаратов химической промышленности.

Природные уголь и графит загрязнены примесями, неоднородны по составу, недостаточно прочны и поэтому не применяются.

Для изготовления искусственного угля в качестве исходного сырья применяют нефтяной и каменноугольный кокс, реже антрацит и графит. Промытый соляной кислотой для удаления золы и прокаленный углеродистый материал в виде порошка смешивают с каменноугольным пеком и антрацитовым маслом, прессуют под давлением 200—1500 ат в изделия или блоки, а затем подвергают обжигу без доступа воздуха при температуре 1350—1400°С. Во избежание возникновения внутренних напряжений, деформаций и трещин обжиг ведут в течение 5—8 суток и охлаждение в течение 6—10 суток. В процессе обжига связующее вещество массы превращается в кокс, происходит спекание и усадка угольной массы, удаляются летучие; прочность массы значительно повышается, она превращается в монолит. Угольные блоки имеют пределы проч-

ности: при растяжении—26—59 кг/см^2 , при сжатии—134—138 кг/см^2 , при изгибе 56—117 кг/см^2 .

По отношению к кислотам, щелочам и растворам различных солей угольные изделия и блоки отличаются высокой химической инертностью.

К недостаткам угольных изделий и блоков относятся высокая пористость (22—25%) и относительно низкая теплопроводность. Для повышения теплопроводности их подвергают отжигу—графитизации в электрических печах в течение 2—3 суток, из которых 15 ч материал выдерживается при температуре 2 400—2 500° С.

Искусственный графит отличается очень высокой степенью чистоты (99% С и выше), по теплопроводности в 3—8 раз превышает уголь и по химическим свойствам занимает особое положение в ряду других материалов. Кислоты, щелочи и растворы солей в обычных условиях на него не действуют; он растворяется только в расплавленных металлах и разрушается только сильными окислителями. Графитовые изделия, так же как и угольные, имеют высокую пористость, и поэтому область их применения в химическом аппаратостроении ограничена. Пористость можно устранить пропиткой угля и графита фенолформальдегидными смолами, главным образом резольными. Пропитка производится в автоклавах, давление в которых колеблется в пределах от абсолютного давления в 10—20 мм рт. ст. до 4—5 ата при температуре 35—40°С. В этих условиях изделия пропитываются на глубину 20—30 мм и их вес увеличивается за счет смолы на величину до 20%. Пропитанные уголь и графит подвергают термической обработке путем медленного нагревания до 120—130°С. В процессе пропитки и термической обработки прочность изделий и блоков повышается, а пористость их снижается настолько, что они становятся непроницаемыми для жидкостей и газов. Теплопроводность при этом практически не изменяется.

Термостойкость углеграфитовых изделий, пропитанных фенолформальдегидной смолой, не превышает 130°С. Для повышения их термостойкости для пропитки вместо фенолформальде-

гидной смолы можно использовать кремнийорганические соединения.

В СССР широкое распространение получил новый материал на основе графита и смол—антегмит АТМ-1—порошок, из которого изделия получают прессованием в горячих формах. После формовки изделия не требуют дополнительной обработки. Если изделие должно иметь повышенную химическую стойкость и теплостойкость, его после формовки подвергают термической обработке. В табл. 2-19 приведена техническая характеристика графита до и после пропитки фенолформальдегидной смолой и антегмита.

Таблица 2-19

Техническая характеристика пропитанного и непропитанного графита и антегмита АТМ-1

Наименование характеристики	Графит		Антегмит АТМ-1
	до пропитки	после пропитки	
Удельный вес, г/см^3 . . .	2,25	2,07	1,93
Объемный вес, г/см^3 . . .	1,57	1,85	1,35
Открытая пористость, % . .	27,2	0,0	—
Привес после пропитки, %	—	15,2	—
Предел прочности:			
при растяжении, кг/см^2	70	178	250
при сжатии, кг/см^2 . .	260	1 850	—
Температурный предел применения, °С	400	180	130
Теплопроводность, $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$	—	—	32

Из пропитанного угля и графита изготовляют плиты, блоки, трубы и соединительные части к ним, арматуру и другие детали теплообменников. Из антегмита изготовляют плиты, трубы и другие детали, которые должны быть химически стойкими и теплопроводными.

Пластические массы

Пластмассы имеют достаточную прочность, высокую химическую стойкость в агрессивных средах, водонепроницаемость, тепло- и морозостойкость и малый удельный вес. Многие из них обрабатываются механически и свариваются. Чистые пластические массы относятся к диэлектрикам и имеют малую теплопроводность. Для повышения теплопроводности в них в качестве наполнителя иногда добавляют графит.

В аппаратостроении получили применение пластмассы на основе: битумов, конденсационных и полимеризационных смол.

Пластические массы на основе конденсационных смол. В результате реакции конденсации (образования нового соединения из двух молекул различных исходных веществ) образуются фенолформальдегидные смолы, на основе которых можно получать прочные и химически стойкие материалы: фаолит, текстолит, текстобаолит, стеклотекстолит, фенолит, а также некоторые лаки, мастики и арзамиты (вяжущие вещества), применяемые для футеровки, обмазки и склеивания.

Фаолит А представляет собой продукт смешения фенолформальдегидной резольной смолы (на щелочном катализаторе) с асбестом или графитом, служащим наполнителем. Фаолит А (наполнитель—асбест) стоек в кислотах: серной (до 50%), соляной (до 100%), фосфорной (до 80%), лимонной (до 70%), уксусной; в растворах многих солей, некоторых органических соединениях (бензол, формалин, дихлорэтан) и газах (хлор, сернистый газ). Фаолит А не стоек в азотной кислоте и щелочах.

Фаолит Т или графолиит (наполнитель—графит с асбестом). Кроме стойкости в указанных выше средах стоек в плавиковой кислоте и кремнефтористых соединениях.

Основные свойства фаолитов

Удельный вес, $г/см^3$	1,5—1,65
Коэффициент линейного расширения $2 \cdot 10^{-5}$	
Предел прочности при растяжении, $кг/см^2$	145,5
Предел прочности при изгибе, $кг/см^2$	527
Твердость по вдавливанию, $кг/мм^2$	20
Ударная вязкость, $кг \cdot см/см^2$	2—2,5
Сцепляемость с железом, $кг/см^2$	5—20
Водопоглощение за 24 ч, %	0,3—0,5
Теплопроводность, $ккал/м \cdot ч \cdot град$	
Фаолит А	0,25
Фаолит Т	0,90
Теплостойкость, $^{\circ}C$	100 $^{\circ}C$

Изделия из фенолформальдегидных смол могут быть получены методами литья, формования и прессования.

Из сырой фаолитовой массы на вальцах и в прессах изготавливают листы и трубы, а также формуют вентили, краны, задвижки, фитинги и другие детали для работы под давлени-

ем до 5 атм. Затем эти изделия обрабатывают путем нагревания в течение 30 ч при 130 $^{\circ}C$. Термическая обработка вызывает конденсацию исходных продуктов, в результате которой резольная смола переходит в твердое неплавкое и нерастворимое вещество—резит.

Фаолитовые изделия можно подвергать обточке, резке, сверловке и шлифованию. Фаолитовые изделия хорошо склеиваются в стык или внахлестку фаолитовой замазкой. Для отверждения замазки собранный узел или аппарат покрывают спиртовым раствором резольной смолы и подвергают термической обработке.

Из фаолита изготавливают емкостные сосуды и реакторы размером до 1,5 $\times$ 1,5 м, ректификационные колонны диаметром до 1 м и высотой до 8 м, трубопроводы диаметром до 250 мм, мешалки, холодильники, насосы, вентиляторы.

Листовой фаолит широко применяется для футеровки металлической химической аппаратуры.

Текстолит—прессованный материал из хлопчатобумажной ткани или иного слоистого материала, пропитанного резольной смолой, и отвержденный при температуре до 130 $^{\circ}C$. В химическом аппаратостроении из текстолита изготавливают трубы, текстолитовой тканью обматывают детали с последующей термической обработкой.

Текстобаолит представляет собой несколько слоев фаолита с промежуточной обмоткой слоев хлопчатобумажной тканью или с наружным слоем из текстолита.

Предел прочности текстобаолита при растяжении—до 1000 $кг/см^2$, при изгибе—до 1600 $кг/см^2$; водопоглощение за 24 ч—0,6—0,8%; теплопроводность—0,20—0,29 $ккал/м \cdot ч \cdot град$; теплостойкость—до 125 $^{\circ}C$.

Из текстобаолитовых цагг изготавливают трубы, предназначенные для выброса агрессивных кислых газов с температурой до 120 $^{\circ}C$.

Стеклотекстолит—слоистый материал, сходный с текстолитом, но изготовленный на основе стеклянной ткани и обработанный термически при 150 $^{\circ}C$. Этот материал прочнее текстолита, не усыхает и не разбухает, легко

поддается механической обработке на станках; из него изготавливают детали насосов, лопасти мешалок и другие детали, работающие с повышенной механической нагрузкой.

Фенолит изготавливают путем прессования смеси фенолформальдегидной и полихлорвиниловой смол при 180°C . Фенолит прочен, стоек в некоторых кислотах и щелочах, отличается повышенной теплостойкостью и водостойкостью. Из фенолита изготавливают трубы, фасонные части для их соединения, арматуру, насосы, воздуходувки и футеровочные изделия.

Арзамит—вязущий материал, получаемый смешением резольной смолы в присутствии бензиловой кислоты с порошкообразным наполнителем (кремнеземом, графитом, сернистым барием) и катализатором (паратолуолсульфохлоридом). В зависимости от состава различают четыре сорта арзамита, из которых следует отметить арзамит 1 (кислотостойкий). Состав арзамита 1 в сыпучем состоянии (мука): 70% кварцевой муки, 20% кремнезема, 10% паратолуолсульфохлорида; в растворе: 90% фенолформальдегидной смолы, 10% бензилового спирта. Арзамит 2 (кислото-щелочестойкий), кроме названных компонентов, содержит в растворе ди-хлоргидринглицерин. Арзамиты используют в качестве вяжущего материала при футеровке химической аппаратуры различными плитками.

Кремнийорганические соединения (силиконы), получаемые на основе арилхлорсиланов (например, RSiCl_3 , R_3SiCl), сочетают преимущества неорганических и органических материалов. Эти смолы характеризуются химической стойкостью и теплостойкостью, присущими силикатным материалам, и высокой эластичностью, присущей органическим веществам.

Силиконы представляют собой твердые смолы, каучукообразные вещества, масла или жидкости. В виде жидкостей они отличаются текучестью в интервале температур от -100 до $+400^{\circ}\text{C}$; в виде каучукообразных продуктов они сохраняют эластичность в пределах от -40 до $+200^{\circ}\text{C}$.

В сочетании со стеклянной тканью силиконы образуют стеклотексто-

литы. Пластические массы из кремнийорганических смол получают путем смешения с наполнителями и другими добавками (асбестом, алюминиевым порошком и др.).

Силиконовые пластмассы применяют для изготовления отдельных деталей и корпусов приборов, в качестве прокладочных и уплотнительных материалов для высокотемпературного оборудования, а также в качестве жаростойких, коррозионностойких и электроизоляционных масс. Так, жаростойкая эмаль на основе полиорганометаллосилоксанов пригодна для защиты от коррозии при $500-550^{\circ}\text{C}$, а материал марки КМК-28 выдерживает температуру до 650°C .

Пластические массы на основе полимеризационных смол. Реакция полимеризации представляет собой уплотнение нескольких однородных молекул в одну сложную молекулу.

Из полимеризационных материалов наибольшее распространение в аппаратостроении получили полихлорвиниловые смолы, полиизобутилен и асбовинил.

Полихлорвиниловый пластикат (смола с пластификатором), изготавливаемый вальцеванием и каландрированием в виде мягких, гибких листов и лент, применяется для обкладки химической аппаратуры в производстве серной, азотной, соляной и других крепких кислот. Пластикаты химически стойки, водонепроницаемы, однако они отличаются слабой термостойкостью ($60-70^{\circ}\text{C}$) и малой сцепляемостью с металлами, что ограничивает их применение.

Винипласт—продукт горячего (при $150-160^{\circ}\text{C}$) прессования в твердую пластическую массу полихлорвиниловой смолы с присадками стабилизаторов (аминов, окислов металлов, металлических мыл) и мягчителей (стеарина, парафина, трансформаторного масла). Винипласт достаточно прочен и имеет высокую химическую стойкость, однако его низкая теплопроводность (в 200 раз меньше теплопроводности меди) и недостаточная теплостойкость (до 50°C), исключающая паровой обогрев, ограничивают область его применения. Винипласт

может быть использован в качестве материала для теплообменников в тех случаях, когда допустимы такие теплопроводные материалы, как керамика, стекло, фарфор, фаолит.

Винипласт хорошо поддается обработке резанием. Его можно обтачивать, строгать, сверлить, фрезеровать, шлифовать и полировать и сваривать. Под действием струи горячего воздуха с температурой 200—220° С. винипласт размягчается, становится пластичным и приобретает способность сцепляться при небольшом давлении. При нагреве до 130—140° С винипласт может быть сварен с помощью стержня из полихлорвиниловой смолы. Это дает возможность соединять сваркой детали при изготовлении аппаратов, трубопроводов и арматуры из винипластовых листов и труб. Арматуру и изделия из винипласта можно ремонтировать путем заварки поврежденных мест, что значительно снижает эксплуатационные расходы и увеличивает срок службы изделий. Изделия из винипласта можно склеивать растворами перхлорвиниловой смолы с достаточно высоким пределом прочности при растяжении (30—40 кг/см²).

Как показал опыт эксплуатации, изделия из винипласта превзошли благодаря высокой химической стойкости такие антикоррозионные материалы, как фаолит, текстолит, кислотостойкую резину и др. В ряде случаев винипласт заменяет цветные металлы (свинец, бронзу, медь) и нержавеющую сталь.

Основные свойства винипласта: предел прочности при растяжении—600 кг/см², при изгибе—1200 кг/см²; теплоустойчивость—60° С; морозостойкость—минус 20° С; теплопроводность—0,13 ккал/м·ч·град; удельный вес—1,3 г/см³; коэффициент линейного расширения—8,0·10⁻⁵.

Винипласт склонен к ползучести и набуханию в воде, при этом его механические свойства снижаются.

Устранение ползучести возможно путем армирования аппаратов из винипласта бандажами или посадкой их в металлический корпус. При этом, учитывая большой коэффициент линейного расширения винипласта, вкладывая из него следует выполнять меньших размеров, чем внутренние габариты металлического корпуса.

Из винипласта изготавливают царги для аппаратов, арматуру, трубы, соединительные патрубки, вентиляционные короба, детали для насосов и вентиляторов, а также пленку, листы и стержни для различных изделий. Винипласт может применяться также в качестве футеровочного материала для защиты аппаратуры от действия агрессивных сред.

Лаки и эмали на основе полихлорвинила получили распространение как антикоррозионные покрытия. Растворы перхлорвиниловой смолы (полихлорвинил с повышенным содержанием хлора)—лаки—применяют для защиты от коррозии электролизных ванн, скрубберов для сернистого газа, хранилищ серной кислоты и др.

Заводы выпускают химически стойкие перхлорвиниловые лаки и эмали марок: грунт ХСГ-26, эмаль ХСЭ-1, эмаль ХСЭ-3, эмаль ХСЭ-14, эмаль ХСЭ-26, лак ХСЛ, лак ОНИЛХ-3 и др.

Полиизобутилены — продукты полимеризации изобутилена при температуре минус 100° С в присутствии катализатора. Полиизобутилены могут иметь различный молекулярный вес; с его увеличением их физические свойства существенно изменяются (от жидкости до каучукообразной массы).

Выпускаются главным образом высокомолекулярные полиизобутилены типа П-100 и П-200 (число обозначает средний молекулярный вес в тысячах).

Удельный вес полиизобутилена—0,93, морозостойкость—до минус 55° С; при более низкой температуре появляется хрупкость. При нагревании до 100° С пластичность полиизобутилена возрастает, а прочность снижается. При 150—200° С полиизобутилен сваривается; при 180—200° С его можно формовать, а при 350—400° С он разлагается.

В смеси с наполнителем (графитом, сажей и др.) полиизобутилены вальцуют в листы, которые применяют в качестве обкладочного материала по металлу и бетону, для защиты аппаратов и труб от агрессивных сред и в качестве эластичного материала для комбинированных футеровок. Из полиизобутилена изготавливают также эластичные трубы, служащие защитным слоем в трубах большого диаметра, выпол-

ненных из металла, бетона или других материалов.

Недостатки полиизобутилена: низкая теплостойкость ($50-60^{\circ}\text{C}$) и ползучесть на холоду, т. е. большие остаточные деформации при длительном действии сжимающих сил.

В аппаратах, работающих под давлением, применение полиизобутиленовых обкладок не допускается.

Фторопласты — пластические массы, получаемые путем полимеризации фтористых производных этилена. В качестве антикоррозионных материалов в аппаратостроении получили применение фторопласт-4 и фторопласт-3.

Фторопласт-4 — рыхлый волокнистый порошок, дающий при спекании плотную массу. По химической стойкости фторопласт превосходит благородные металлы и сплавы и не растворяется даже при высокой температуре. Температурный предел его применения — от -100 до $+250^{\circ}\text{C}$. Фторопласт-4 не хрупок, легко изгибается, а при давлениях $100-200\text{ кг/см}^2$ легко раскатывается с увеличением площади в 3—3,5 раза без трещин и разрывов. Из спрессованной массы фторопласт-4 формованием на каладрах, строжкой из болванки и другими способами получают пленки, пластины, сильфоны, тонкостенные трубы, вентили и другие изделия. Фторопласт-4 сваривают путем предварительного размягчения при $380-390^{\circ}\text{C}$ и сжатия свариваемых частей под давлением до 510 кг/см^2 . При температуре выше 400°C фторопласт-4 разлагается.

Фторопласт-3 выпускается в виде тонкого, рыхлого и легкосыпучего порошка. В отличие от фторопласта-4 он плавится при 210°C , поэтому его можно применять при температурах не выше 70°C . При комнатной температуре фторопласт-3 имеет более высокую твердость, чем фторопласт-4. По химической стойкости фторопласт-3 значительно уступает фторопласту-4, не смачивается водой и не набухает в ней; поддается прессованию и может отливаться под давлением. Фторопласт-3 получил применение как уплотнительный материал при высоких давлениях и как антикоррозионное покрытие в виде пленки.

В качестве материалов для изготовления деталей защитных покрытий из высокополимерных материалов применяют такие материалы, как асбовинил (до $100-110^{\circ}\text{C}$), полистирол (до 85°C), полиэтилен (до 115°C) и др.

Пластические массы на основе битумов. Битумно-пековые материалы применяют в качестве вяжущих веществ, антикоррозионных покрытий и гидроизоляционной массы. В качестве конструкционных материалов битумно-пековые вещества нашли ограниченное применение, так как их теплостойкость невысока и механические свойства низки.

Каучуковые материалы

Синтетический и натуральный каучук в соединении с серой образует резину ($2-3\%$ S) или эбонит — твердую резину ($40-50\%$ S), которые нашли широкое применение в химическом машиностроении в качестве прокладок, обкладочного материала в сосудах, а также при изготовлении труб, гибких шлангов, мешалок, деталей насосов, арматуры, небольших сосудов и т. п.

Резина имеет высокую эластичность и поэтому выдерживает без разрушения различные деформации, смягчает ударные нагрузки, хорошо противостоит истиранию. Последнее свойство обуславливает широкое применение резины в аппаратах, работающих с суспензиями. Резина хорошо противостоит воздействию многих агрессивных сред.

Резина применяется при температурах не выше 75°C , среда горячего воздуха вызывает старение резины.

Для повышения прочности резины на растяжение, стойкости против истирания, твердости и удельного веса в состав резиновых смесей вводят такие наполнители, как сажа, мел, каолин.

Резина химически инертна по отношению к большинству неорганических соединений, за исключением сильных окислителей. По отношению к органическим соединениям резина менее стойка: большая часть газов диффундируют через мялкую резину. В результате длительного взаимодействия с водой резина набухает.

Эбонит более стоек химически, чем резина, меньше набухает в воде и имеет такую твердость, которая позволяет изготавливать из него различные детали аппаратов.

2-29. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

Коррозия — разрушение металлов вследствие химического или электрохимического воздействия внешней среды.

Потери металла от коррозии очень велики, поэтому борьба с коррозией является важной народнохозяйственной задачей.

Несмотря на активную борьбу с коррозией, потери от нее составляют значительный процент от веса металла сооружений и изделий, находящихся в эксплуатации. Большая часть металла, поврежденного коррозией, возвращается для переплавки, и часть его теряется. Так, необратимые потери углеродистой стали из-за коррозии составляют около 5%.

Коррозия приносит большие косвенные убытки. Замена корродированного оборудования приводит к длительным простоям не только заменяемого оборудования, но и других связанных с ним агрегатов. Смена проложенных под землей проржавевших трубопроводов связана с трудоемкими и длительными земляными работами.

По механизму протекания процесса различают два вида коррозии: химическую и электрохимическую.

Химическая коррозия металлов протекает в неэлектролитах и сухих газах. Процесс химической коррозии представляет по существу прямое химическое взаимодействие металла с агрессивной средой.

Типичный случай химической коррозии — окисление неохлаждаемых подвесок труб топочными газами в паровых котлах.

Электрохимическая коррозия металлов протекает в растворах электролитов и влажных газах и сопровождается протеканием электрического тока. Переносчиком электричества в растворе служат ионы, присутствующие в нем вследствие диссоциации, а в металле — свободные электроны.

При электрохимической реакции происходят окисление металла и вос-

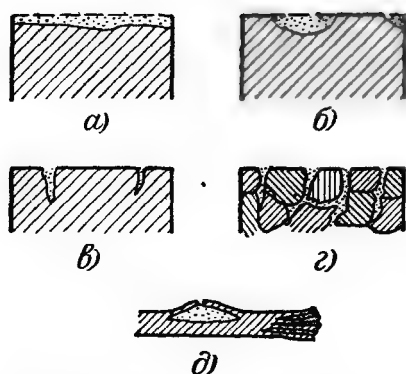


Рис. 2-24. Виды коррозионных разрушений.

а — сплошная коррозия; б — коррозия пятнами; в — язвенная коррозия; г — межкристаллитная коррозия; д — подповерхностная коррозия.

становление водорода или кислорода, выделение металлов из растворов и др.

Типичный случай электрохимической коррозии — коррозия стального корпуса конденсатора, работающего на морской воде и имеющего непосредственный контакт с латунными трубными досками.

В зависимости от степени поражения поверхности различают несколько разновидностей процесса коррозии.

При сплошной коррозии поверхность поражена равномерно (рис. 2-24, а). Прежде чем деталь или изделие выйдут из строя, прокорродируют большие объемы металла. Процесс коррозии в таких случаях хорошо заметен и редко приводит к неожиданному разрушению. Сплошная коррозия особенно опасна в тех случаях, когда ее продукты вызывают порчу или снижают качество обрабатываемого в аппарате вещества.

Почти так же часты случаи, когда коррозия распространяется не по всей поверхности, а отдельными пятнами — коррозия пятнами (рис. 2-24, б).

При язвенной коррозии (рис. 2-24, в) процесс интенсивно развивается только в отдельных точках поверхности металла. В этих местах образуются «язвины», которые могут привести к свищам. Язвины заполняются продуктами коррозии, поэтому их не всегда удается обнаружить. При язвенной коррозии в ее продукты превращается относительно небольшая часть металла, однако часто все изделие ста-

новится непригодным для дальнейшего использования. Язвенной коррозии бывают подвержены различного рода емкости: цистерны, химические аппараты и др.

При межкристаллитной коррозии (рис. 2-24,г) разрушению подвергаются избирательно только границы зерен металла. Поверхность изделия может оставаться гладкой, а металл не в состоянии воспринимать нагрузки, так как отдельные зерна его разобщены прослойками окислов. Такая коррозия особенно опасна для сосудов, работающих под давлением. Резкое сосредоточение коррозионных разрушений делает их эквивалентными острым надрезам и ускоряет разрушение конструкции под действием нагрузок.

Сплавы алюминия подвержены подповерхностной коррозии (рис. 2-24,д), характеризующейся образованием окислов, в объеме под поверхностью металла. Иногда наблюдается расслоение листового металла в результате избирательной коррозии со стороны торца листа.

2-30. ХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЕ

В случае окисления металла в газовой среде на его поверхности образуется тонкая пленка окислов, которая может при определенных условиях препятствовать дальнейшему развитию коррозии. Тончайшая, невидимая окисная пленка существует даже на блестящей поверхности металла.

Процесс диффузии газа через окисную пленку начинается с его адсорбции на поверхности. Атомы газа проникают к металлу путем диффузии через пленку. Одновременно с диффузией атомов или ионов газа от поверхности пленки окисла к металлу имеет место встречная диффузия металла к поверхности окисной пленки. В большинстве случаев окисление металлов происходит за счет диффузии металла к поверхности окисной пленки. Чем толще пленка, тем большее расстояние нужно пройти атомам кислорода и металла в ходе диффузии через пленку и тем медленнее нарастает ее толщина. Следовательно, весовое количество металла, прокорродировав-

шего в единицу времени на единице поверхности контакта, постепенно уменьшается. Так пленка окисла защищает металл и тормозит развитие процесса коррозии.

Количество прокорродировавшего металла при образовании защитной пленки в зависимости от времени может быть выражена параболическим законом:

$$q = \sqrt[n]{k\tau},$$

где q — количество металла, вступившего в реакцию с кислородом;

τ — время от начала процесса коррозии;

k — константа скорости окисления;

n — коэффициент, величина которого для большинства сталей равна 2.

В тех случаях, когда пленка окисла рыхлая или имеет много трещин, она не может служить защитным слоем, и коррозия со временем не замедляется. Количество прокорродировавшего металла в случаях, когда защитная пленка не образуется, увеличивается по линейному закону. При этом коэффициент n в показателе степени равен единице.

Между крайними случаями — образованием плотной защитной пленки и образованием рыхлой, пористой пленки, практически не защищающей металл, могут быть промежуточные состояния, которым соответствует изменение коэффициента n от 2 до 1.

Для надежной защиты металла от развития процесса коррозии объем пленки, образующейся из металла и кислорода, должен быть больше объема металла, пошедшего на ее образование. В противном случае пленки не хватит на покрытие металла; так, объем окислов щелочных и щелочно-земельных металлов меньше объема металла, из которого они образовались, поэтому эти металлы очень плохо сопротивляются коррозии.

Для создания защитного действия пленки это условие необходимо, но далеко не достаточно. Так, окислы некоторых металлов, например молибдена, при высокой температуре удаляются с поверхности металла в виде паров. В этом случае защитная пленка не образуется, хотя объем окислов больше объема окислившегося металла.

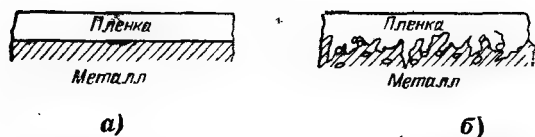


Рис. 2-25. Границы металла и пленки окисла.
а — резкая ровная граница; б — изрезанная граница с переходной зоной.

Кроме того, пленка должна быть плотной, не иметь трещин и пор.

Для хорошей защиты металла пленка должна не только обладать хорошими защитными свойствами, но и плотно прилегать к металлу. Образование пленки происходит с увеличением объема, поэтому в ней возникают внутренние напряжения. Чем толще пленка, тем больше напряжения на границе между ней и металлом. Если напряжения превысят предел прочности пленки, в ней возникнут трещины.

Пленка прочнее держится на поверхности металла в том случае, когда между ней и металлом нет резкой границы (рис. 2-25). Пленка должна иметь возможно большую прочность и пластичность и иметь по отношению к металлу возможно более близкий коэффициент линейного расширения. Тогда при резких теплосменах на границе между пленкой и металлом не будут возникать дополнительные напряжения.

Скорость газовой коррозии $K_{\text{газ}}$ определяется уменьшением веса металла, отнесенным к 1 см^2 поверхности в час, т. е.

$$K_{\text{газ}} = \frac{G_0 - G_1}{S\tau} [\text{г/см}^2 \cdot \text{ч}],$$

где G_0 и G_1 — вес металла соответственно до опыта и после полного удаления окислов, г;

S — площадь поверхности образца, см^2 ;

τ — время, ч.

При образовании защитной пленки скорость газовой коррозии с течением времени снижается.

Слой окалины на углеродистой стали имеет сложное строение (рис. 2-26), зависящее от температуры, времени коррозии и состава газовой среды. Снаружи находится слой окиси железа Fe_2O_3 — окисла с наибольшим содержанием кислорода; к металлу прилегает слой закиси железа FeO —

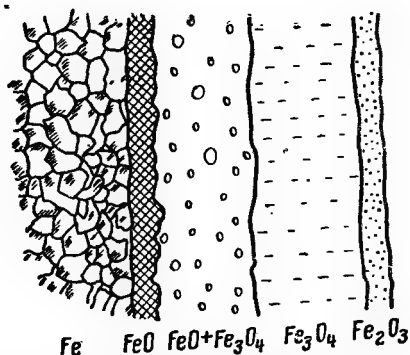


Рис. 2-26. Строение слоя окалины по поверхности углеродистой стали.

окисла с наименьшим содержанием кислорода. При переходе от одного слоя к другому содержание кислорода изменяется скачкообразно. Защищает металл только слой FeO , остальные слои пронизаны трещинами, порами и отслоениями.

На скорость коррозии очень влияет состав газовой среды, особенно наличие в ней водяных паров (рис. 2-28) и соединений серы.

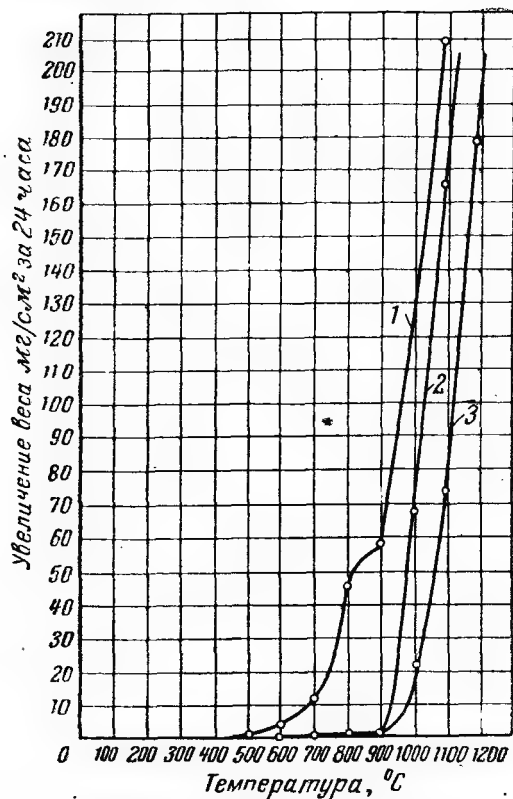


Рис. 2-27. Привес металла в зависимости от температуры

1 — углеродистая сталь; 2 — хромистая нержавеющая сталь 3Х13; 3 — хромоникелевая аустенитная сталь 1Х18Н9Т.

При увеличении скорости потока газов скорость коррозии вначале увеличивается. При скорости около 1 м/мин достигается предельное значение скорости коррозии, остающееся в дальнейшем с увеличением скорости потока неизменным. Давление не оказывает влияния на скорость коррозии. Если при увеличении скорости транспортируемого теплоносителя или реагента появляется эрозия — абразивный износ, то скорость разрушения металла возрастает.

Гладкие поверхности подвержены коррозии несколько меньше, чем шероховатые, однако резкого влияния степени чистоты поверхности на газовую коррозию не наблюдается.

С повышением температуры скорость диффузии газов через пленку окисла к металлу и встречной диффузии атомов металла возрастает, что ускоряет окисление и увеличение толщины окисной пленки. Если пленка имеет защитные свойства, то процесс дальнейшего окисления замедляется (рис. 2-28).

Влияние температуры на скорость коррозии сталей Ст. 3, 3Х13 и 1Х18Н8 в воздухе показано на рис. 2-27, из которого видно, что углеродистая сталь интенсивно корродирует в воздушной среде, начиная с 500°С, а стали 3Х13 и 1Х18Н8 — с 900°С.

Наиболее эффективное средство защиты стали от газовой коррозии — легирование. В качестве легирующих элементов применяют хром, кремний и алюминий, окисляющиеся легче железа. Совместно с его окислами они образуют окисную пленку на поверхности стали, препятствующую интен-

сивному окислению. В целях сохранения защитного действия пленки необходима постоянная диффузия легирующих элементов к поверхностному слою для поглощения кислорода, проникающего путем диффузии через пленку. Диффузия легирующего элемента протекает тем быстрее, чем меньше размеры его атомов, легче перемещающихся между атомами основного металла. Этим объясняются хорошие защитные свойства хрома, алюминия и кремния, атомы которых меньше атомов железа.

Все легирующие элементы, повышающие окислительную стойкость стали, дают тугоплавкие окислы, достаточно прочные при высокой температуре. Молибден, окислы которого легко испаряются при высокой температуре, не пригоден для легирования окислительных сталей, однако он может значительно повышать коррозионную стойкость в агрессивных средах при электрохимической коррозии.

Присутствие во многих низколегированных сталях для теплообменных аппаратов (15ХМ, 12МХ, 12ХМФ) молибдена вызвано желанием увеличить не их коррозионную стойкость, а прочность при повышенных температурах.

Из легирующих элементов на окислительную стойкость стали лучше всего влияет хром.

При комплексном легировании эффективность защитного действия легирующих элементов повышается.

Стали, легированные кремнием и хромом, называют силхромами, а хромом, кремнием и алюминием — сихромами. Однако применение силхромов и сихромалей ограничено из-за их хрупкости в эксплуатации при высоких температурах. Поэтому преимущественное распространение получили стали, легированные только хромом в качестве основного элемента, защищающего от коррозии.

Высокие коррозионную стойкость и прочность при высоких температурах имеют стали, легированные хромом и никелем; высокое содержание никеля способствует образованию структуры устойчивого при комнатной температуре однородного аустенита. Наиболее распространенная марка такой стали аустенитного класса —

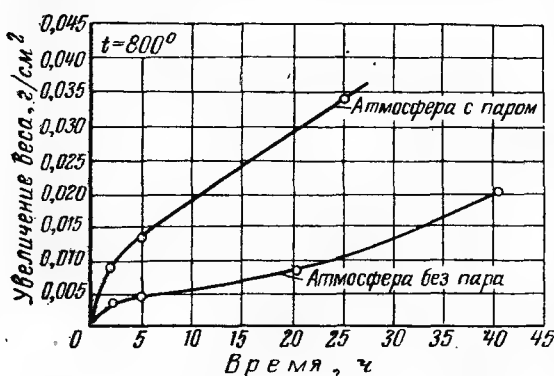


Рис. 2-28. Влияние водяных паров на коррозию углеродистой стали.

1X18H9T. Титан вводится в эту сталь для предупреждения межкристаллитной коррозии.

При содержании хрома на верхнем пределе, а никеля на нижнем сталь 1X18H9T может иметь структуру, состоящую из зерен аустенита, между которыми местами располагаются участки феррита, подверженные интенсивной коррозии. Поэтому в последнее время получила распространение модификация стали этой марки с повышенным содержанием никеля—1X18H12T.

Наиболее окалиностойки стали, имеющие структуру однородного твердого раствора. Малоуглеродистые хромистые стали с содержанием хрома более 12% дают однородный твердый раствор на основе α -решетки феррита, а хромоникелевые — на основе γ -решетки аустенита. Только в случае однородного твердого раствора на поверхности металла образуется однородная сплошная пленка окислов.

Из нержавеющей сталей с содержанием хрома 17—25%, а также сталей, содержащих 14—18% хрома и 14—18% никеля с присадкой некоторых дополнительных легирующих элементов, изготавливают трубы. Сортамент бесшовных труб определяется ГОСТ 5543-50, а механические свойства приведены в табл. 2-20.

Таблица 2-20

Механические свойства труб из нержавеющей стали в состоянии поставки

Марка стали	Предел прочности, кг/мм ²	Относительное удлинение, %
	не менее	
1X18H9	56	40
1X18H9T*	56	40
1X14H14B2M	55	35
X18H12M2T	54	35
X17	45	17
X28	45	17
X25T	45	17

* Трубы из стали 1X18H9T должны выдерживать испытание на интеркристаллитную коррозию.

Микроструктура перлитных сталей, содержащих хром, в равновесном состоянии неоднородна. В ней имеются участки феррита и перлита. Такие стали (15XM, 12X1MФ и т. п.) хуже сопро-

тивляются коррозии, так как на границе между разнородными участками нарушается сплошность защитной пленки окисла.

Примеси в стали обычных количеств углерода, марганца, кремния, серы и фосфора не оказывают заметного влияния на газовую коррозию.

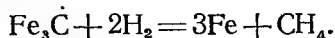
В начальной стадии окисления наклепанный металл корродирует в газовой среде несколько быстрее, чем ненаклепанный. В дальнейшем это влияние быстро сглаживается.

В процессе газовой коррозии происходит обезуглероживание поверхностного слоя под влиянием диффузии углерода к пленке окисла, образования смеси закиси и окиси углерода и удаления этой смеси в окружающую газовую среду. Поэтому в структуре поверхностных слоев может полностью отсутствовать перлит. Поверхностное обезуглероживание снижает прочность и твердость наружных слоев металла. В этих слоях легче появляются усталостные трещины, так как при уменьшении содержания углерода снижается величина предела усталости.

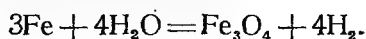
Хром, марганец и кобальт в небольших количествах несколько задерживают обезуглероживание. Активно препятствует обезуглероживанию алюминий, в значительно меньшей степени — вольфрам.

Оба эти элемента затрудняют диффузию углерода.

Обезуглероживание стали может протекать не только в среде окислительных газов. Так, сталь сильно обезуглероживается в среде водорода и в среде водяных паров без примеси кислорода при температурах порядка 500°С и выше, когда начинает заметно сказываться диссоциация водяных паров. При этом между свободным водородом или водородом, получившимся в результате диссоциации водяных паров, и цементитом протекает реакция



Источником водорода может служить также реакция окисления железа водяными парами



Этот водород в свою очередь может принять участие в процессе обезуглероживания стали.

При высоких рабочих температурах водород растворяется в стали. Со снижением температуры растворимость водорода резко уменьшается, и он выделяется из твердого раствора в молекулярном состоянии, накапливаясь в микроскопических трещинках и по границам зерен. Давление водорода достигает сотен и тысяч атмосфер. Получаются микроскопических размеров надрывы по границам зерен и сталь становится хрупкой.

Наиболее радикальная мера борьбы с водородной хрупкостью стали — рациональное легирование. Аустенитные хромоникелевые стали значительно более устойчивы в этом отношении, чем другие. Они не охрупчиваются даже при работе в содержащих водород средах при давлении до 250 атм и температуре до 450°С.

Некоторые стали склонны к межкристаллитной коррозии в газовой среде, т. е. к избирательной коррозии по границам зерен. Металл становится рыхлым и легко разрушается, хотя весовая доля прокорродировавшего металла весьма незначительна.

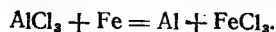
Межкристаллитной коррозии в среде газов, содержащих серу, подвержены стали аустенитного класса с содержанием 8—20% никеля. Никель образует с серой химическое соединение (сульфид), которое в свою очередь образует с никелем легкоплавкую эвтектику никель—сульфид с температурой плавления 624°С. Поэтому следует избегать применения хромоникелевых сталей при высоких температурах в среде газов, содержащих серу.

В тех случаях, когда нельзя избежать применения хромоникелевых сталей аустенитного класса, например, из-за высоких температур и больших напряжений, рекомендуется применять стали с возможно более высоким содержанием хрома и пониженным содержанием никеля. Сталь 1Х20Н25СЗ (ЭЯЗС), содержащая 20% хрома и 25% никеля, отличается более высокой коррозионной стойкостью во многих средах, чем стали типа 1Х25Н12. Однако в случае большой concentra-

ции SO_2 в газах или парах сталь 1Х25Н12 более стойка.

К способам защиты от газовой коррозии относится создание на поверхности стального изделия окалинстойкого сплава с алюминием или хромом путем диффузионной металлизации при высокой температуре. Для защиты металла нужен плотный, свободный от пор слой окалинстойкого материала, очень прочно сцепленный с основным металлом. Поэтому пленки, наносимые гальваническим способом, неприемлемы.

Хорошие результаты при насыщении поверхностного слоя алюминием — алитировании — дает следующий способ. Изделия из углеродистой стали укладывают в железный ящик и тщательно засыпают смесью, состоящей из 45% алюминиевой пудры, 45% глинозема (Al_2O_3) и 10% нашатыря (NH_4Cl). Ящик помещают на 1—3 ч в печь, нагретую до 900—950°С. При взаимодействии нашатыря и алюминия образуются пары хлористого алюминия AlCl_3 , взаимодействующие с железом по реакции



Треххлористое железо улетучивается, а алюминий диффундирует в глубь изделия. Алитированный слой толщиной 0,3—0,4 мм хорошо защищает деталь от окисления при высокой температуре, но механические свойства его невысоки.

Алитирование широко применяют при изготовлении окалинстойкой арматуры печей, деталей газогенераторов и т. п. Покрытие алюминием путем погружения в жидкий металл дает менее надежные результаты.

Диффузионное хромирование протекает медленнее, чем алитирование. На поверхности изделия образуется не только химически стойкий, но и прочный при высоких температурах слой из сложных карбидов. Для хромирования применяют смесь, состоящую из 60% порошка металлического хрома, 36% глинозема или каолина и 4% нашатыря, в которую помещают хромируемую деталь. Процесс ведут при температуре около 1000°С. За 25—30 ч на поверхности детали из малоуглеродистой стали образуется хромированный слой толщиной от 0,05 до 0,1 мм.

Процесс хромирования в газообразной среде более экономичен. При газовом хромировании хлористый водород приводят в соприкосновение с кусками феррохрома, и образующиеся пары хлоридов хрома направляют в реторту с изделием. В результате обменных реакций происходит диффузия хрома в сталь. Хромированный слой толщиной 0,05—0,1 мм может быть получен за 3—4 ч при температуре 1000°С.

Для повышения коррозионной стойкости часто применяют азотирование — насыщение поверхностного слоя детали азотом. В частности, азотируют резьбу шпилек арматуры и фланцевых соединений.

Детали при азотировании помещают в печь с температурой около 700°C , заполненную аммиаком. При такой температуре аммиак в значительной степени диссоциирует на водород и атомарный азот, который легко усваивается поверхностью детали, на которой образуется слой нитридов.

Продолжительность процесса азотирования для получения слоя с высокой коррозионной стойкостью составляет 10—60 мин.

Реже для защиты металла от газовой коррозии при высоких температурах изделия покрывают окалиностойкими эмалями. Трудно получить хорошее сцепление между эмалью и металлом при переменах температур, так как коэффициенты линейного расширения металла и эмали различны. Кроме того, эмали хрупки и дают трещины при небольших деформациях. В настоящее время эмали и керамические покрытия изучают в связи с развитием реактивных газотурбинных авиационных двигателей. Такие покрытия успешно применяют для деталей, работающих при температурах до 1450°C .

Лучшей защитой от газовой коррозии следует признать образующиеся естественным путем защитные пленки окислов.

Процесс химической коррозии меди и медных сплавов в газовой среде в общем аналогичен процессу коррозии сталей. Медь корродирует во многих газообразных средах значительно медленнее железа. Помимо окисляющих газов, содержащих кислород, сильную коррозию меди вызывают содержащие серу газы — SO_2 и H_2S . Двуокись углерода CO_2 и азот практически инертны по отношению к меди. Очень сильное разъедание меди наблюдается в присутствии газообразной соляной кислоты.

Водород при температурах выше 400°C вызывает водородную хрупкость меди. На границах зерен в технически чистой меди имеется некоторое количество закиси меди Cu_2O . При высоких температурах развивается реакция $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 = 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$. Образующиеся пары воды, резко увеличиваясь в объеме под действием высокой температуры, разрушают связь по границам зерен. Аналогично действуют на медь все восстановительные газы. Медь, пораженная

водородной хрупкостью, не выдерживает сколько-нибудь заметной деформации.

Стойкость меди и медных сплавов против газовой коррозии значительно повышают присадки бериллия, магния и алюминия. В несколько меньшей степени улучшают окалиностойкость меди кремний, олово и цинк.

Бериллиевые бронзы, применяемые, например, для изготовления упругих элементов манометров, кроме хорошей сопротивляемости газовой коррозии, имеют хорошие механические и удовлетворительные технологические свойства.

2-31. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЕ

Электрохимическая коррозия протекает в растворах электролитов. Механизм этого процесса связан со структурой металла и природой электролита. Наиболее существенно на процесс электрохимической коррозии влияет высокая электропроводность металлов, обусловленная наличием электронов, слабо связанных с положительными ионами, расположенными в узлах кристаллической решетки.

Примеси располагаются в металле и на его поверхности. Если поместить металл в раствор электролита, то менее активные включения служат катодами, а сам металл — анодом. Получается как бы множество короткозамкнутых через основной металл гальванических элементов (рис. 2-29). Иногда катодные участки имеют значительные размеры, например латунные трубные доски и трубы поверхностного конденсатора, работающего на морской воде, менее активны, чем стальной корпус конденсатора. Поэтому

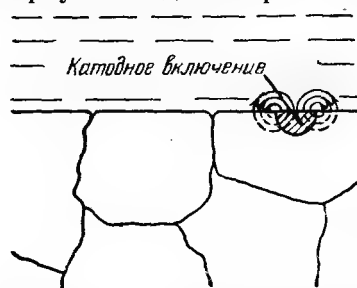


Рис. 2-29. Гальванические элементы, образованные основным металлом, химически менее активным включением и электролитом (пунктиром и стрелками показано направление тока).

латунные детали являются катодными участками по отношению к стальному корпусу.

Даже в химически чистом металле между отдельными участками его поверхности возникает разность потенциалов, обусловленная небольшим различием химического состава зерен, различием кристаллической ориентировки зерен по отношению к поверхности металла, различием состояния металла в пределах зерна и на границе между зернами. Однако эта разность потенциалов во много раз меньше разности потенциалов между участками из разнородных металлов или из металлов и включений.

Процесс электрохимической коррозии развивается на границе раздела двух фаз — металла и раствора электролита, где образуются два слоя: в металле у поверхности атомы ионизированы и в растворе против металлических ионов располагаются ионы из электролита с противоположным зарядом. Возникновение таких слоев приводит к образованию разности потенциалов.

При электрохимической коррозии одновременно протекают два процесса: анодный и катодный.

а) Анодный процесс — переход металла в раствор в виде иона; при этом в металле остаются избыточные электроны. Если бы других процессов не происходило, то между раствором и металлом быстро установилась бы разность потенциалов и процесс растворения прекратился.

б) Катодный процесс — ассимиляции электронов атомами или ионами, способными поглощать электроны.

В большинстве случаев участки на поверхности металла, на которых происходит его растворение (анодный процесс) и на которых происходят восстановительные реакции (катодный процесс), пространственно разделены. Не исключены случаи, когда они протекают на одних и тех же местах.

Катодные и анодные участки обычно разобщены пространственно, поэтому между ними возникает электрический ток.

Переход металла в раствор происходит на анодных участках, которые

разрушаются. На катодных участках, где происходят восстановительные реакции, разрушения не происходит.

При погружении углеродистой стали в раствор электролита на поверхности располагаются участки, состоящие из перлита и феррита. Между раствором и ферритными участками устанавливается одна разность потенциалов, а между тем же раствором и перлитными участками — другая; между участками возникает электрический ток. Носителями зарядов в растворе служат ионы электролита, а в металле — свободные электроны. Участок с более низким потенциалом растворяется, а к участку с более высоким потенциалом перемещаются электроны и на его поверхности протекают восстановительные реакции. Если коррозия протекает в кислом растворе, то на участке с более высоким потенциалом происходит восстановление положительных ионов водорода.

Разность потенциалов возникает при контакте двух разнородных металлов. Например, при контакте латуни с железом положительным электродом служит латунь и разрушению подвергается железо.

Возникновение разности потенциалов происходит не только при контакте разнородных металлов или между различными структурными составляющими одного и того же металла или различными металлами, достаточно наличия небольшой химической или физической неоднородности металла. Примером может служить часто встречающаяся при эксплуатации теплообменных аппаратов коррозия сварных швов. Металл шва неизбежно несколько отличается по своему химическому составу от основного металла и содержит обычно несколько меньше углерода. Литая структура, образующаяся в процессе формирования сварного шва, остается на весь срок эксплуатации; основной же металл имеет другую структуру, сформировавшуюся при прокатке или последующей термической обработке. Такая разница в структуре металла и химическом составе приводит к образованию гальванических пар, в результате чего наблюдается коррозионное разрушение металла шва или прилегающего к нему основного металла.

Процесс растворения металла на участках с более низким потенциалом можно затормозить путем образования на этих участках пленки оксидов. В этом случае металл, хорошо растворяющийся в первый момент в электролите, перестает растворяться. Это явление носит название пассивации.

Пассивность — состояние повышенной коррозионной устойчивости металла или сплава, вызванное торможением процесса.

Состояние пассивности можно создать искусственно. Железо хорошо растворяется в разбавленной азотной кислоте, но не в концентрированной. Если воздействовать на железо концентрированной азотной кислотой, оно переходит в пассивное состояние. В таком состоянии при погружении в слабую кислоту железо начинает растворяться не сразу, а по прошествии некоторого промежутка времени, в течение которого устраняется пассивирующая защитная пленка на участках с низким потенциалом.

Состояния пассивности можно достигнуть не только изменением воздействующей внешней среды, но и введением в структуру твердого раствора слабо пассивирующегося основного металла сильно пассивирующихся элементов. Например, при растворении в железе таких сильно пассивирующихся элементов, как хром, кремний, алюминий, можно получить сплав, приближающийся по стойкости к легирующим элементам. На этом принципе основано получение коррозионно-устойчивых и нержавеющих сталей.

В большинстве случаев переход металла в пассивное состояние связан с образованием сплошной очень тонкой пленки оксида.

Стойкость против электрохимической коррозии в значительной степени зависит от структуры металла. Неоднородные структуры, как правило, менее устойчивы, чем сплавы типа твердых растворов. Чем более мелкодисперсны катодные включения, тем быстрее развивается электрохимическая коррозия.

Углеродистая сталь в закаленном состоянии со структурой мартенсита — однородного пересыщенного раство-

ра углерода в α -железе — растворяется в разбавленной серной кислоте примерно в 6 раз медленнее, чем та же сталь со структурой тростита — высокодисперсной смеси кристаллов цементита и феррита. Увеличение частиц цементита в результате повышения температуры отпуска приводит к повышению коррозионной стойкости. Однако даже после отпуска при 700°C коррозионная стойкость отпущенной стали уступает стойкости стали, закаленной на мартенсит. Межкритический нагрев (выше 723°C , но ниже верхней критической точки A_{c3}), вызывающий частичную перекристаллизацию, дает лучшие результаты, чем отпуск при 710 — 720°C .

Химическая неоднородность зерен и их границ может привести к интенсивной избирательной коррозии границ зерен. Межкристаллитной коррозии в среде конденсата подвержена, в частности, аустенитная сталь 1X14H14B2M (ЭИ257) при высокой температуре. В процессе эксплуатации этой стали наблюдается диффузия углерода и хрома из тела зерна к его границам с образованием сетки карбидов по границе зерна. Скорость диффузии углерода значительно превышает скорость диффузии хрома, поэтому около границ зерен в связи с недостатком свободного хрома, входящего в твердый раствор и расходующегося на образование карбидов, структура стали становится ферритной. Эти участки интенсивно корродируют (рис. 2-30). Менее склонна к межкристаллитной коррозии в паровой и газовой среде сталь 1X18H12T, у которой углерод связывается не с хромом, а с титаном, оказывающим стабилизирующее действие. Аналогично титану влияет ниобий.

Способ выплавки стали почти не влияет на ее стойкость против электрохимической коррозии.

Сера образует включения сернистого железа и сернистого марганца, являющиеся катодными участками, ускоряющими процесс электрохимической коррозии.

При протекании процесса коррозии в нейтральных средах концентрация углерода в сталях и чугунах не влияет на его скорость. Скорость процесса коррозии в кислых средах увеличива-



Рис. 2-30. Межкристаллитная коррозия стали 1X14N14B2M (ЭИ257), вызванная контактом с конденсатом.

ется с увеличением содержания углерода.

Чистота обработки поверхности может сильно влиять на устойчивость против электрохимической коррозии. В среде водного раствора хлористого натрия стали 0X13 и 1X18N9T после пескоструйной обработки корродируют в 2—3 раза быстрее, чем после тонкой шлифовки. Электрополировка, при которой получается наиболее гладкая поверхность, повышает коррозионную стойкость стали в 3—4 раза по сравнению с тонкой шлифовкой.

Механические напряжения несколько ускоряют сплошную коррозию.

Многие детали теплообменных аппаратов работают в коррозионно-активной среде под действием механических напряжений, которые могут возникать в деталях в результате технологических операций. Напряжения (например, наклеп трубы в вальцовочном соединении) не всегда можно снять при помощи термической обработки, так как она приводит к нару-

шению плотности соединения. Напряжения и деформации увеличивают скорость коррозии, переводя ее из равномерной или местной в межкристаллитную.

В малоуглеродистой стали при работе в щелочной среде и наличии пластической деформации в металле наблюдается появление трещин в результате возникновения так называемой каустической хрупкости. Сталь, обладавшая в исходном состоянии высокой пластичностью, начинает разрушаться хрупко. При этом излом имеет зернистую поверхность, коррозия распространяется по границам зерен.

Каустическая хрупкость встречается чаще всего около заклепок, в месте сгибов листов, в вальцовочных соединениях теплообменных аппаратов, работающих в среде щелочных растворов, в клепаных цистернах для транспортировки щелочей и т. п.

Даже в котлах, работающих на воде с небольшим содержанием щелочи, появляются трещины каустической хрупкости около заклепок или вальцовочных соединений. Их образование объясняется проникновением воды по тонким капиллярным щелям при малейших нарушениях герметичности. Вдоль щелей давление понижается, а температура повышается; влага при этом испаряется и раствор непрерывно обогащается щелочами и солями, которые не уходят с парами воды. Постепенно концентрация щелочи повышается настолько, что возможно образование трещин каустической хрупкости.

В котлах основной метод борьбы с каустической хрупкостью заключается в добавлении к воде веществ, препятствующих развитию этого вида коррозии, например нитрата натрия и сернокислого натрия.

Особенно подвержена каустической хрупкости сталь с высоким содержанием азота. В связи с этим приобретает большое значение дегазация металла перед разливкой.

При знакопеременных нагрузках и наличии коррозионно-активной среды образуется первичная усталостная трещинка, в которой развиваются процессы коррозии. Окислы расклинивают трещинку, вызывая преждевременное

разрушение металла. Поэтому предел усталости в коррозионно-активной среде всегда меньше, чем в нейтральной.

Процесс коррозии может сопровождаться разрушением окисной пленки в результате трения или абразивного износа металла движущимся быстро потоком жидкости или газа, содержащим твердые частицы. В этом случае процесс коррозии не тормозится защитной пленкой, и разрушение развивается очень быстро.

Известны случаи, когда при перекачивании слабого раствора SO_2 в воде, содержащей мелкодисперсные частички золы, разрушавшие пленку окислов, колеса центробежных насосов, отлитые из стали X17, разрушались в течение 4—5 суток.

Процессы электрохимической коррозии могут развиваться не только в больших объемах электролитов, но и в тонких пленках влаги, конденсирующейся на поверхности изделия. Типичным примером электрохимической коррозии в тонкой пленке является атмосферная коррозия.

Атмосферная коррозия протекает в тонкой пленке влаги, осаждающейся на поверхности металла из-за пересыщения воздуха водяными парами (роса) или в случае дождя.

Через тонкую пленку влаги к поверхности металла легко проникает кислород. Пленка оказывает значительное сопротивление протеканию тока, поэтому коррозионные токи распространяются на небольшие объемы. Из-за высокого электросопротивления влажной пленки неоднородность материала влияет на коррозию на расстоянии долей миллиметра. Растворение окислов серы, солей NaCl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, всегда имеющих в атмосфере, увеличивает электропроводность электролита, что ускоряет коррозию.

Атмосфера городских и промышленных центров содержит коррозионно-активные газы, в том числе SO_2 , образующийся при сжигании каменного угля и нефти. Сильно ускоряют коррозию большинства металлов и сплавов сероводород и хлор.

Находящиеся в воздухе частицы угля и золы гигроскопичны и содержат растворимые составные части, повышающие агрессивность атмосферы

и образующие гальванические элементы в местах контакта с металлом.

Для защиты металлических конструкций, работающих на открытом воздухе, от атмосферной коррозии их обычно покрывают красками. Особенно стойки алюминиевые краски, сохраняющиеся при хорошей грунтовке до 10—15 лет. При транспортировке теплообменников для защиты их от коррозии применяют смазки.

Повышенную стойкость против атмосферной коррозии имеют стали, содержащие небольшое количество меди или меди с фосфором, например низколегированная сталь 10ХНДП. Охрупчивающее влияние фосфора нейтрализуется введением в состав этой стали около 1% никеля.

Часть металлоконструкций соприкасается непосредственно с почвой: трубопроводы, кабели, металлические опоры, днища некоторых резервуаров и т. п. Для подземных коммуникаций большую опасность представляет почвенная коррозия. Известны случаи, когда трубопроводы с толщиной стенки 8—10 мм выходили из строя в течение 1 года.

Почвенная коррозия по своей природе представляет разновидность электрохимической коррозии. Почва содержит минеральные вещества, гниющие органические вещества, а также влагу. На процессы коррозионного разрушения большое влияние оказывают воздухопроницаемость и электропроводность почв. Если трубопровод проложен на отдельных участках в грунтах разного состава, могут образоваться макроскопические гальванические пары. Наиболее опасны в отношении почвенной коррозии грунты с хорошей электропроводностью.

Процесс коррозии в почве значительно ускоряется вследствие жизнедеятельности микроорганизмов. Так, в почвах с плохим доступом кислорода могут жить бактерии, вырабатывающие сероводород, углекислоту и другие агрессивные газы, способствующие ускоренному разрушению металлических конструкций. В состав протоплазмы таких бактерий входят ионы железа, которые они заимствуют непосредственно со стенок металлоконструкций.

В процессе почвенной коррозии на поверхности металла образуются коррозионные элементы большой протяженности, достигающие нескольких сотен метров. Это приводит к большим плотностям тока на анодных участках и к быстрому разрушению металла. На поверхности металла при этом образуются язвы, скорость роста которых может достигать в глубину до 10 мм в год.

В условиях почвенной коррозии нерационально применять легированные стали и цветные сплавы из-за их высокой стоимости, тем более, что, например, низколегированные стали

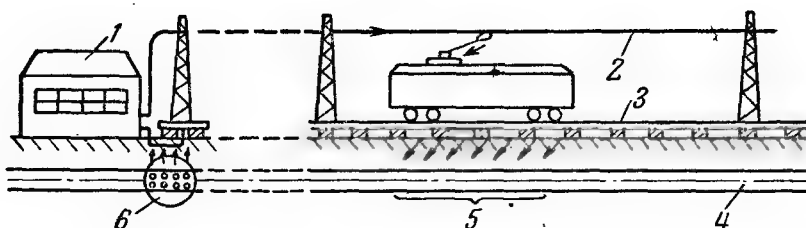


Рис. 2-31. Схема коррозии трубопровода от блуждающего тока.

1 — тяговая подстанция; 2 — контактный провод; 3 — обратный рельс; 4 — трубопровод, идущий параллельно трамвайному пути; 5 — зона входа блуждающего тока в трубопровод (безопасная зона); 6 — зона выхода блуждающего тока (зона разрушения).

сопротивляются почвенной коррозии почти так же, как углеродистые.

Для защиты от почвенной коррозии чаще всего используют различные покрытия, которые должны быть водонепроницаемыми, химически стойкими, хорошо сцепляющимися с металлом, механически прочными и диэлектричными. Широко используют нефтебитумные защитные покрытия с минеральными наполнителями. После нанесения защитных покрытий верх труб делают обмотку из бумаги, джутовой ткани, парусины, асбестового картона, стеклянной ткани; иногда применяют пластические массы и резину.

Для снижения агрессивности почв применяют их химическую обработку. Так, кислые почвы обрабатывают известью. Вместо вынутого грунта иногда в траншею кладут инертный наполнитель.

Коррозионное разрушение металлических конструкций в почве может быть следствием блуждающих токов. Для электросварочных аппаратов, электролизных ванн и других аппаратов применяют постоянный ток, отвлечения которого в землю вызывают коррозионное разрушение металлов. Переменный ток практически не вызывает коррозии.

Имеют место случаи коррозионного разрушения трубопроводов блуждающими токами от линии городского трамвая. Ток поступает к вагону трамвая по воздушному контактному проводу от тяговой подстанции, на которой находятся электрогенераторы постоянного тока (рис. 2-31). От вагона к тяговой подстанции ток возвращается по рельсам, причем часть тока уходит в почву. Если параллельно трамвайному пути проложен трубопровод, то по нему также потечет ток и участок трубопровода, на котором выходит ток, подвергается разрушению вследствие образования глубоких язв.

Блуждающие токи могут достигать большой величины. Так, в Нью-Йорке на трубопроводе диаметром около 150 мм в часы наибольшей загрузки трамвая был зафиксирован блуждающий ток силой 70 а. Следует иметь в виду, что ток силой всего в 1 а в течение года разрушает 9 кг железа, 11 кг меди или 34 кг свинца. А так как разрушение идет избирательно, то в негодность могут прийти значительно большие массы металла. Радиус действия блуждающих токов зависит от электропроводности почвы. Иногда блуждающие токи от электрифицированных железных дорог могут вызвать коррозию на расстоянии около 10 км.

Для борьбы с блуждающими токами на трубопроводах устанавливают изолирующие

муфты или фланцы. Отрицательный полюс электрогенератора постоянного тока соединяют с трубопроводом, ток с него уходит по проводнику, и разрушения в этом месте не происходит. Битумные покрытия служат хорошей изоляцией от блуждающих токов, однако если в них образуются повреждения, то в этом месте разрушение происходит ускоренно.

2-32. КОРРОЗИЯ ХИМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Коррозионному разрушению подвергаются элементы теплообменных аппаратов химической, в частности нефтяной, промышленности.

В нефти присутствуют сернистые соединения, нафтеновые кислоты, соли буровых вод. При переработке нефтяных дистиллятов в них вводят кислоты, щелочи, агрессивные вещества — катализаторы и др. Все эти вещества вызывают коррозию оборудования.

Безводные растворы серы и органических сернистых соединений не взаимодействуют с углеродистыми сталями, но разрушают медь.

Сухие оксиды сероводород при комнатной температуре не взаимодействуют со сталью, алюминием, свинцом и цинком, однако даже небольшое содержание влаги сильно повышает агрессивность среды. При повышении температуры взаимодействие активизируется.

Нефть, содержащая сероводород, влагу и кислород, вызывает коррозию углеродистых и низколегированных сталей и меди. Стали 1X18H9T, 1X18H12M2T и X18H25C не корродируют в ней. Коррозия в газобразной среде протекает более интенсивно, чем в жидкой. В такой среде стали 1X18H9T, 1X18H12M2T и X18H25C подвержены язвенной коррозии. По коррозионной стойкости стали

X17 и X25T являются полноценными заменителями сталей 1X18H9T и 1X18H12M2T, но существенно уступают им в технологических свойствах.

В целях повышения пластичности и снижения хрупкости этих сталей температуру нагрева их под прокатку снижают до 1000°С. После прокатки дают кратковременный нагрев до 780—820°С с последующим охлаждением в воде. В результате этих мер значительно повышаются пластичность и ударная вязкость ($\delta > 20\%$; $a_k = 5 \div 10 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$). Для этих сталей разработаны режимы сварки.

Высокохромистые стали можно с успехом применять для изготовления сварной химической аппаратуры, работающей при статических нагрузках в уксусной, фосфорной и азотной кислотах, щелочах и многих других агрессивных средах.

В химической промышленности применяют также нержавеющие стали, легированные 12—14% хрома, которые уступают сталям 1X18H9T и 1X18H25C по устойчивости.

Добавка к хромистой стали алюминия и кремния повышает ее устойчивость в среде, содержащей серу.

Широкое применение в горячих аппаратах, перерабатывающих нефть с большим содержанием серы, нашли стали ЭИ496 (типа 0X13) и 1X13. Их применяют в качестве облицовочного материала и для внутренних устройств (тарелок, колпачков и т. п.).

Алюминий, свинец, цинк и олово устойчивы в высокосернистых средах.

Сухой сернистый ангидрид (SO_2) не вызывает коррозии углеродистой стали, однако содержание 0,1% влаги приводит к интенсивной коррозии при комнатной температуре.

Скорость коррозии углеродистой стали во влажном SO_2 при комнатной температуре достигает 2, а чугуна 1—3 мм/год. В среде с влажным сернистым ангидридом рекомендуют применять чугун с содержанием 14% никеля, 6% меди и 3% хрома. Хорошо работают в этих условиях стали типа 18-8, особенно содержащие 2—4% молибдена (ЭИ171 и ЭИ183), а при низких температурах также латуни и бронзы. Агрессивность сернистого ангидрида возрастает с повышением температуры.

Нафтеновые кислоты вызывают очень интенсивную коррозию при 250—375°С. Сильнее всего разрушается свинец. Если коррозию свинца в нафтеновых кислотах принять за 100, то скорость коррозии других металлов расположится в следующей последовательности: цинк 41, медь 3, олово 2, железо 1, алюминий 0. Нафтеновые кислоты активны при высоких температурах, однако не исключена возможность их взаимодействия с углеродистой сталью и при низких температурах. Например, наблюдалась коррозия конденсаторов тяжелого бензина в установке, перерабатывающей майкопскую нефть.

Буровые воды, в которых растворены соли щелочных и щелочно-земельных металлов и слабых кислот, оказывают коррозионное воздействие на металлы. Наиболее агрессивны воды, в которых содержатся хлористый магний и хлористый кальций. С повышением температуры агрессивность буровых вод возрастает.

Особенно сильную коррозию конденсационно-холодильных аппаратов нефтяной промышленности вызывает слабый раствор хлористого водорода.

С хлористым водородом встречаются не только при перегонке и крекинге засоленных нефтей и мазутов, но и во многих технологических процессах переработки нефти, когда он вводится специально.

Соляная кислота разрушает сталь и чугун. С повышением концентрации кислоты, температуры и количества подводимого кислорода интенсивность коррозии возрастает. Хорошо сопротивляются коррозии в растворах соляной кислоты при комнатной температуре высококремнистые чугуны, содержащие 14% кремния типа ферросилида (ГОСТ 203-41), однако они разрушаются в горячей соляной кислоте. Присадка к этому чугуну 3,5—4% молибдена делает его устойчивым в горячей соляной кислоте. Такой чугун называется антихлором. Из ферросилида и антихлора можно получать только отливки, однако они очень хрупки, не поддаются механической обработке и чувствительны к резким изменениям температуры. Ферросилид и антихлор используют из-за их весьма высокой коррозионной стойкости

для корпусов и колес насосов простейшей формы, обечаек абсорбционных колонн, вентилях, труб, фитингов, чанов и др.

Стали типа 0X18H9 и 1X18H9T устойчивы в растворах соляной кислоты низкой концентрации (до 3,5%) при комнатной температуре. Медные сплавы в соляной кислоте более стойки, чем сплавы на основе железа. Высокую коррозионную стойкость имеют латуни ЛО70-1 и ЛО60-1, применяемые в конденсационно-холодильных системах заводов, перерабатывающих засоленную нефть (концентрация соляной кислоты сравнительно невысока, а температура не превышает 100°С).

Сплав 70% никеля и 30% меди весьма устойчив в соляной кислоте концентрацией до 2% при комнатной температуре и в кипящей соляной кислоте концентрацией до 1%. Его применяют для облицовки верхней части колонн с температурой не выше 250°С, перерабатывающих засоленную нефть.

Для изготовления аппаратуры, предназначенной для выпаривания кислот в вакууме и обработки продуктов парами соляной кислоты, используют сплавы никеля с молибденом и кремнием, а также с хромом и молибденом.

Для работы в среде 29%-ной соляной кислоты при 70°С и 21%-ной соляной кислоты при температуре кипения используют литой сплав никеля с молибденом ЭИ461 (68% никеля, 28% молибдена, углерода менее 0,12%, остальное железо). Близок к нему по составу сплав ЭИ460, но он содержит несколько меньше никеля и молибдена и больше железа (59% никеля, 20% молибдена). Его коррозионная стойкость ниже, чем сплава ЭИ461.

Сплав ЭИ460 предназначен для работы с растворами соляной и серной кислот и устойчив в растворах этих кислот любой концентрации при комнатной температуре. Во влажном хлоре и азотной кислоте сплав коррозионной стойкостью не обладает.

Помимо литых, из этих сплавов изготавливают листы, ленты и профильный прокат.

Сплавы ЭИ461 и ЭИ460 не только кислотостойки, но и жаропрочны. Они могут работать при температурах порядка 900°С в условиях теплосмен.

Большие перспективы имеет внедрение двухслойных материалов с облицовкой небольшой толщины из этих сплавов. За рубежом такие материалы уже применяются.

Свинец устойчив в соляной кислоте при низких температурах, но сильно корродирует при нагревании. Алюминий и его сплавы неустойчивы в соляной кислоте, так как образующийся на поверхности хлористый алюминий растворяется в воде.

Сухой хлористый водород при комнатной температуре практически не разъедает углеродистой стали, чугуна, легированных сталей и алюминия, однако с повышением температуры коррозионные процессы получают развитие. Стойкость металла определяется скоростью испарения образующихся на поверхности хлоридов.

Серная кислота широко используется в нефтеперерабатывающей промышленности. При концентрации более 75% она образует на поверхности сталей и чугунов окисные пленки, предохраняющие металл от разрушения при комнатных температурах. Однако дымящаяся серная кислота действует на сталь очень интенсивно, так как не образует окисных пленок. Чугун корродирует слабее стали, так как SO_3 взаимодействует с кремнием чугуна, образуя SiO_2 . Объем окиси кремния больше объема кремния, что приводит к образованию трещин. Слабая серная кислота интенсивно разъедает сталь.

В серной кислоте низкой концентрации очень стоек свинец, на поверхности которого образуется нерастворимая пленка PbSO_4 . Дымящаяся серная кислота растворяет пленку PbSO_4 и свинец корродирует.

Свинец применяют для облицовки нефтеаппаратуры при температурах до 120°С, при более высоких температурах его обычно не применяют из-за резкого снижения механических свойств.

Весьма устойчивы в горячей серной кислоте большой концентрации никелемедистые (70% Ni, 30% Cu) и никелемолибденовые (53% Ni, 22% Mo, 22% Fe) сплавы и никелемедехромистый чугун (14% Ni, 6% Cu, 4% Cr). Наиболее устойчив ферросилид — чугун с 14% кремния.

Загрязнение серной кислоты солями меди интенсифицирует процесс коррозии.

В среде фосфорной кислоты, применяемой в качестве катализатора, устойчивы никелемедистые сплавы (70% Ni и 30% Cu), а также сплав 51% Ni, 19% Mo, 17% Cr и 5% W.

В растворах щелочей достаточной стойкостью в большинстве случаев обладают углеродистые стали. Горячая щелочь способна приводить деформированный и напряженный металл к растрескиванию (явление каустической хрупкости). В этом случае приходится прибегать к облицовке аппаратуры сплавом 70% Ni и 30% Cu или чистым никелем, особенно при температуре среды выше 300° C.

Для работы в щелочных средах непригодны медь, медные сплавы, алюминий, цинк, свинец и олово, на которых образуются гидраты окислов, хорошо растворяющиеся в щелочах.

Для защиты металла от очень агрессивных нефтей применяют армированный бетон, поверхность которого предварительно очищают от нефтепродуктов, окалины и грязи, приваривают арматуру для бетона и натягивают армировочную сетку. Сначала наносят грунтовочный слой цемента толщиной 2—3 мм, затем бетон на основе портланд-цемента. На крышках аппаратов рекомендуется слой не толще 30 мм, на вертикальных стенках 30—50 мм, на днищах 75 мм. Все торкетные работы ведут при плюсовых температурах. Бетон выдерживают в течение 7 суток в среде водяного пара или тумана и после завершения работ пропаривают при 80° C в течение 2 суток.

Хотя стоимость такого покрытия составляет 50—60% стоимости емкости, однако в условиях сильно агрессивной нефти оно себя оправдывает. Для покрытия опасны резкие изменения температуры.

Хорошими защитными свойствами отличается пластическая масса винилпласт. Он устойчив в серной кислоте концентрации до 90%, соляной — всех концентраций, азотной — до 40%, в щелочах до 50%, в растворах солей, воде, смазочных и растительных маслах. Винилпласт не пригоден для работы в среде ароматических и хлорирован-

ных углеводородов, так как при их воздействии он разбухает. Винилпласт можно сваривать. Данные о коррозионной стойкости винилпласта приведены в табл. 2-21.

Иногда в целях борьбы с коррозией применяют гуммирование мягкой резиной или эбонитом, которое хорошо защищает от действия солей, кислот и щелочей. Кислоты высокой концентрации (азотная, концентрированная серная) разрушают резину.

Перед гуммированием поверхность металла очищают пескоструйным аппаратом, промывают бензином, затем наносят слой сырой резины и раскатывают его деревянным валиком до устранения неплотностей между резиной и металлом. После наложения резины проводят вулканизацию — разогрев до 140° C в атмосфере водяного пара при давлении 3 атм и выдержке 3—10 ч.

В химической и нефтеперерабатывающей промышленности используют также биметаллические трубы и листы, что позволяет экономить большое количество легированной стали. Эти листы и трубы могут быть плакированы нержавеющей сталью с одной или двух сторон.

Слой нержавеющей стали обеспечивает коррозионную стойкость, слой углеродистой стали — механическую прочность. В качестве основного материала обычно используют спокойную сталь типа Ст. 3 или сталь 20, обладающие хорошей свариваемостью. В качестве нержавеющей слоя чаще всего используют сталь ЭИ496 (типа 1Х13) — сталь ферритного класса с коэффициентом линейного расширения, близким к коэффициентам линейного расширения перлитных сталей, служащих основным материалом. Соединение нержавеющей стали с углеродистой осуществляется в процессе прокатки. Сварка биметаллических листов и труб производится электродами, обеспечивающими химический состав металла шва типа нержавеющей стали.

Используют также углеродистую сталь, плакированную нержавеющей сталью аустенитного класса типа 18-8. Толщина слоя нержавеющей стали составляет не менее 2,5% толщины основного листа, чаще всего около 10%.

Химические свойства винипласта

Среда	Концентрация, %	Устойчивость	Максимальная температура применения, °С
Серная кислота	До 90	Стоек	40—60
Соляная кислота	Всех концентраций	То же	40—60
Азотная кислота	До 40	То же	40—50
То же	50—98	Не стоек	—
Уксусная кислота	100	Стоек	20—60
Фосфорная кислота	Всех концентраций	То же	20—40
Аммиак	То же	То же	20—40
Щелочи	100	То же	60
Растворы солей всех видов	Всех концентраций	То же	40—60
Отходящие газы, содержащие хлор, хлороводород, воздух и водяные пары	То же	То же	—
Кислые сточные воды	То же	То же	—
Щелочные сточные воды	То же	То же	—
Сероводород сухой	100	То же	60
Сероводородная вода	Всех концентраций	То же	—
Спирты:			
этиловый	Всех концентраций	То же	40—60
метиловый			
Смазочные и растительные масла	То же	То же	60
Ароматические углеводороды: бензол, толуол и т. д.	То же	Не стоек (набухает)	—
Хлорированные углеводороды: дихлорэтан, хлорбензол и т. д.	То же	Не стоек, набухает до растворения	—
Вода		Не гигроскопичен, впитывает воду при комнатной температуре в течение 2 мес. менее 0,01%	—

По имеющимся опытным данным из листов двухслойной стали можно с успехом штамповать сферические днища в холодном и горячем состоянии. Горячую штамповку нужно производить в температурном интервале 1 180—1 200 до 900—925° С.

При холодной штамповке двухслойной стали в несколько переходов необходимо после каждого из них производить термическую обработку для снятия наклепа: нагрев до 1 100° С и охлаждение в воде.

Ручная выбивка сферических днищ и других деталей из двухслойной стали как в холодном, так и в горячем состоянии не допускается.

При работе с уксусной кислотой и другими органическими кислотами при всех концентрациях, а также при переработке фенолов, эфирных масел, фармацевтических продуктов, ледяной уксусной кислоты иногда используют аппараты, изготовленные из серебра, от-

личающегося высокой коррозионной стойкостью. В целях экономии серебра и в тех случаях, когда необходима высокая прочность, используют биметалл: сталь 10, плакированную серебром чистотой не ниже 99,98%. Такой биметалл получают путем совместной прокатки стальной и серебряной заготовок с прослойкой из специального сплава. Диффузионное соединение основного металла с плакирующим слоем происходит через эту прокладку в ходе нагрева в вакууме перед прокаткой, в процессе которой листы получают сильный наклеп. При соединении деталей из биметалла сталь сваривают, а серебро наплавляют на шов. При изготовлении днищ из сварных заготовок перед штамповкой производят термическую обработку (отпуск при 650° С в течение 2 ч), для того чтобы в процессе штамповки не образовывались трещины. Листы биметалла толщиной до 5 мм штампуются без подогрева.

2-33. НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ

Иногда применяют так называемую протекторную защиту конструкций от коррозии; так, для защиты от коррозии стального резервуара в него помещают цинковую пластину, имеющую электрический контакт с резервуаром и растворяющуюся при этом. Действие протектора распространяется на очень небольшую зону, и этот вид защиты в настоящее время почти не используется.

При конструировании теплообменных аппаратов можно в значительной степени уменьшить интенсивное развитие коррозии. Так, следует избегать неблагоприятных металлических контактов, которыми могут служить медь, ее сплавы, свинец и другие металлы. При конструировании аппаратов и трубопроводов необходимо предусматривать отвод конденсата из нижних точек.

Часто в теплообменный аппарат вводят агрессивные растворы, которые до попадания в рабочий объем могут вызвать разрушение прокладок фланцевых соединений подводящих патрубков и коррозию стенок аппаратов, если они стекают по стенкам. Чтобы предотвратить это, агрессивную жидкость следует вводить через патрубки, предохраняющие от стекания жидкости по стенкам (рис. 2-32).

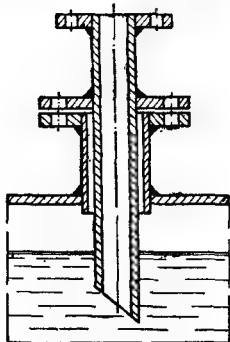


Рис. 2-32. Патрубок, предохраняющий стенки сосуда от воздействия агрессивной жидкости.

На рис. 2-33,а показан сливной штуцер, обеспечивающий слив продукта из аппарата. При такой конструкции отсутствуют застойные зоны, имеющиеся при штуцере, показанном на рис. 2-33,б, так как выступающий конец штуцера препятствует полному сливу жидкости из аппарата. Однако изготовление штуцера по рис. 2-33,а технологически более сложно.

В процессе работы аппарата на его стенках и днище может образоваться неравномерный слой осадков, вызывающий развитие электрохимической коррозии. Поэтому конструк-

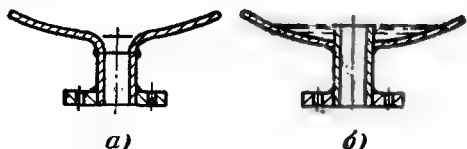


Рис. 2-33. Сливные штуцера.

а — с выштампованным штуцером; б — с выступающим концом штуцера.

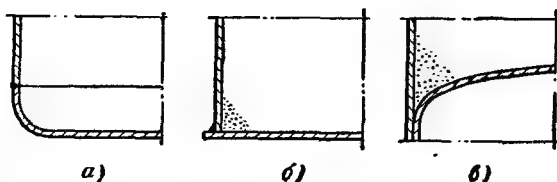


Рис. 2-34. Сопряжение обечайки с днищем.
а — удачное; б и в — неудачные.

ция аппарата должна обеспечивать легкое удаление отложений. В частности, следует стремиться к плавному соединению узлов аппаратов без резких переходов. С этой точки зрения конструкция, показанная на рис. 2-34,а, удачнее конструкции по рис. 2-34,б и в.

Особенно интенсивно коррозия развивается в узких щелях, где отсутствует смена теплоносителя. Такие щели могут образоваться, например, при односторонней сварке обечаек, собранных внахлестку, или при сварке листов точечной сваркой. Сборку обечаек внахлестку следует избегать, а если избежать ее нельзя, нужно обеспечить провар с двух сторон.

В колониях синтеза аммиака имеет место интенсивная газовая коррозия вследствие воздействия на металл водорода при высокой температуре. Чтобы локализовать зону высоких температур, используют холодный водород, идущий на реакцию. Наружный толстостенный корпус колонны отделен от горячих внутренних частей потоком холодного водорода, протекающего с большой скоростью (рис. 2-35).

Укр. НИИХИМАШ разработана конструкция керамических бронированных вентиляй, предназначенных для установки на трубопроводах, по которым перемещаются агрессивные газы, кислоты любой концентрации (кроме плавиковой) и растворы щелочей концентрацией до 2% (рис. 2-36). Рабочая температура теплоносителя может достигать 120°С. Керамическая вставка изготавливается из твердого фарфора с пределом прочности на разрыв не менее 250 кг/см². Материал брони — сталь Ст. 3 или чугун СЧ15-32. Внутренняя поверхность вентиляй покрыта кислотостойкой глазурью. Керамические бронированные вентили выпускают на диаметр условного прохода от 25 до 125 мм.

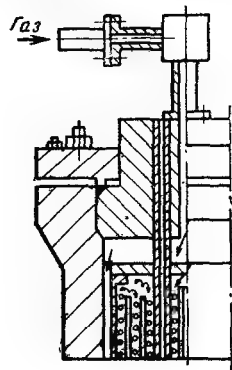


Рис. 2-35. Защита стенок колонны движущимся слоем холодного газа.

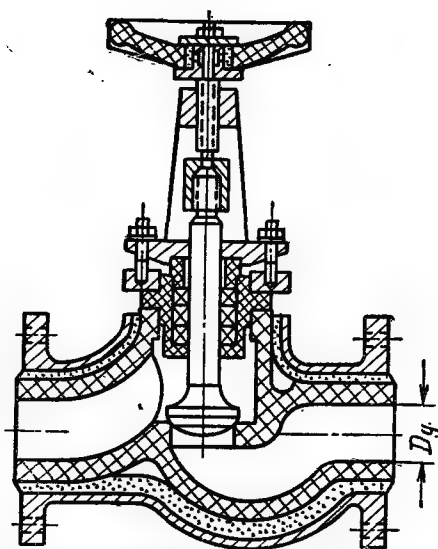


Рис. 2-36. Керамический бронированный вентиль.

и рабочее давление от 6 до 10 атм Славянским керамико-изоляционным комбинатом.

В условиях атмосферной коррозии прокатные профили различной формы, а также сварные конструкции из них по-разному сопротивляются коррозионному разрушению. Скорость атмосферной коррозии меньше в сплошных и обтекаемых сечениях, таких как трубы и корабчатые сечения. Скорость коррозии значительно выше в швеллерах, двутаврах с широкими полками и угольниках, особенно в тех случаях, когда они образуют полости, в которых может скапливаться вода. Таких узлов следует избегать.

Условия работы деталей аппаратов с точки зрения коррозии могут ухудшиться при дополнительных, не учтенных в проекте нагрузках.

В заключение следует отметить, что в настоящее время можно почти для любых условий указать состав сплавов и методы их защиты, обеспечивающие надежную работу конструкции с точки зрения устойчивости против коррозии. Задачей конструктора является выбор наиболее экономичных материалов. Очень часто оказывается возможным при использовании простых мер защиты применять углеродистую сталь обыкновенного качества по ГОСТ 380-60. Применение высоколегированных сплавов должно быть обосновано в каждом конкретном случае.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ НА ПРОЧНОСТЬ

3-1. РАСЧЕТ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ И НАГРУЗКАМ

Почти все теплообменные аппараты работают при избыточном внутреннем давлении или под вакуумом, вследствие чего в их элементах возникают напряжения. При этом к напряжениям, обусловленным разностью давлений в сосуде и окружающей среде, добавляются термические напряжения, а также напряжения от веса сосуда и находящегося в нем теплоносителя. В этих условиях теплообменный аппарат должен быть достаточно прочным.

При выполнении проектных расчетов определяют размеры элементов проектируемых теплообменных аппаратов, которые обеспечат их прочность как в рабочих условиях, так и при гидравлическом испытании. Для проверки возможности использования действующего теплообменного аппарата в изменившихся условиях работы выполняют проверочные расчеты, при которых устанавливают, не превысят ли в новых условиях напряжения

в элементах аппарата допускаемой величины.

Расчет на прочность может выполняться по предельным напряжениям или по предельным нагрузкам. При расчете по предельным напряжениям считают, что пределом несущей способности конструкции служит достижение максимальным напряжением в любом ее месте величины предела текучести. В этот момент какая-то обычно небольшая часть конструкции переходит в пластическое состояние.

Когда же расчет ведут по предельным нагрузкам, то за опасную нагрузку принимают такую, которая вызывает общую пластическую деформацию всей конструкции. Сущность обоих методов может быть пояснена на простейшем примере расчета балки опорной конструкции теплообменника, лежащей на двух опорах и нагруженной сосредоточенной силой посередине (рис. 3-1). Определим максимальную допускаемую величину этой силы обоими методами.

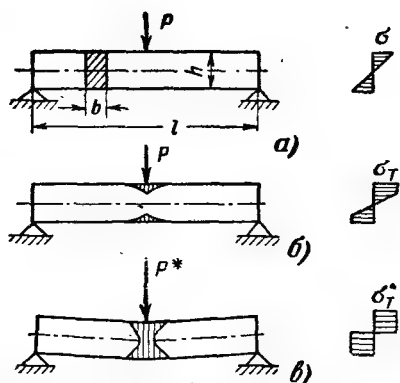


Рис. 3-1. Распределение напряжений в поперечных сечениях балки, расположенных вблизи приложения силы.

a — упругое; *б* — упруго-пластическое; *в* — пластическое состояние металла среднего сечения.

Сила P , примененная в среднем сечении балки, вызывает опорные реакции, примененные по ее концам и равные $0,5 P$. Относительно среднего сечения балки действует момент

$$M = 0,25 Pl.$$

В расчете по предельным напряжениям принимают, что для надежной работы балки нормальные напряжения в крайних волокнах должны оставаться меньше предела текучести, т. е.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{Pl}{4W} \leq \sigma_T, \quad (3-1)$$

где P — примененная сила, кг ;
 l — расстояние между опорами, мм ;
 W — момент сопротивления сечения, мм^3 ;
 σ_T — предел текучести материала, $\text{кг}/\text{мм}^2$.

После подстановки в неравенство (1) момента сопротивления

$$W = \frac{bh^2}{6},$$

решая его относительно P , получаем, величину максимальной допускаемой силы из расчета по предельным напряжениям

$$P \leq \frac{2}{3} \frac{bh^2 \sigma_T}{l}, \quad (3-2)$$

где b — ширина балки;
 h — высота балки.

Однако при достижении предела текучести в крайних волокнах несущая способность балки еще не исчер-

пана. В средней части сечения есть волокна, находящиеся в упругом состоянии (рис. 3-1,б). При переходе всего металла среднего сечения в пластическое состояние, возникнет так называемый пластический шарнир, и балка потеряет несущую способность. Нагрузка, вызвавшая потерю несущей способности, называется предельной.

Силы и моменты, относящиеся к предельному состоянию, принято обозначать звездочкой P^* и M^* . Следовательно, для рассматриваемого случая

$$M^* = \frac{P^* l}{4}. \quad (3-3)$$

С другой стороны, предельный момент равен моменту от напряжений. Эпюра напряжений при предельном состоянии показана на рис. 2-1,в. Относительно центра тяжести сечения балки в среднем сечении действует момент от напряжений

$$M_n = \sigma_T \frac{bh}{2} \cdot \frac{h}{2} = \sigma_T \frac{bh^2}{4}. \quad (3-4)$$

Приравняв уравнения (3-3) и (3-4) и решая их относительно P^* , получаем величину максимальной допускаемой силы из расчета по предельным нагрузкам:

$$P^* = \frac{bh^2 \sigma_T}{l}. \quad (3-5)$$

Как видно из сравнения формул (3-2) и (3-5), при расчете по предельным нагрузкам величина максимально допускаемой силы для рассматриваемого случая на 33,3% больше, чем при расчете по предельным напряжениям.

Метод расчета по предельным нагрузкам справедлив для пластичных материалов, из которых изготовляют большинство деталей теплообменных аппаратов и выпарных установок — некалененных углеродистых и легированных сталей, никелевых, медных и алюминиевых сплавов. Этот метод расчета позволяет более точно оценивать несущую способность конструкции в целом и уменьшать ее металлоемкость.

Метод расчета по предельным нагрузкам применим для деталей из хрупких материалов (например, закаленных сталей, ферросилида, антихлора), разрушение которых наступает без заметной пластической деформации.

ции. Детали из хрупких материалов следует рассчитывать по методу предельных напряжений, выбирая условия прочности по теории максимальных нормальных напряжений. Согласно этой теории разрушение в каком-либо объеме металла наступает при достижении одним из главных напряжений предела прочности.

3.2. ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ И ДОПУСКАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Расчет теплообменных аппаратов на прочность должен обеспечить, чтобы в процессе эксплуатации, а также при гидравлических испытаниях возникающие напряжения не привели к остаточным искажениям формы сосуда или разрушению его.

За предельную величину напряжения, по которой выбирают допускаемое напряжение, принимают предел текучести, если опасны потеря устойчивости или сильное искажение формы сосуда или конструкции, либо предел прочности, если опасно только разрушение.

При расчете допускаемых напряжений, возникающих в сосудах, вводят коэффициент запаса прочности, выбор которого должен производиться как с учетом надежности работы, так и экономии металла.

Научно обоснованный (дифференциальный) метод выбора коэффициента запаса прочности предложил И. А. Одинг. Согласно этому методу коэффициент запаса прочности получается как произведение частных коэффициентов, учитывающих точность применяемых расчетных формул, достоверность данных по прочности материала и технологические факторы:

$$n = skTM;$$

здесь n — коэффициент запаса прочности, вводимый в дальнейший расчет;

s — запас прочности, необходимый при правильно выполненном расчете, достоверных сведениях о прочности материала и отсутствии неблагоприятных технологических факторов;

k — коэффициент, учитывающий конструктивные факторы;

T — коэффициент, учитывающий особенности технологического процесса;

M — коэффициент, учитывающий соответствие методов испытания металла условиям работы в конструкции.

Каждый из приведенных коэффициентов получается, в свою очередь, как произведение

коэффициентов, характеризующих более детальные, конкретные факторы.

В частности, коэффициент $s = s_1 s_2$, где s_1 учитывает надежность сведений о прочности металла, получаемых при прямом испытании его (не косвенно, по другим показателям прочности и эмпирическим формулам), а s_2 — степень ответственности детали.

Коэффициент $k = k_1 k_2$, где k_1 учитывает точность расчетных формул и точность учета действующих сил, а k_2 — концентрацию напряжений.

Коэффициент $T = T_1 T_2 T_3$, где T_1 учитывает снижение прочности из-за состояния поверхности; T_2 — влияние остаточных напряжений; T_3 — напряжения, возникающие при тугих посадках и сборке статически неопределимых систем.

Коэффициент $M = M_1 M_2 M_3$, где M_1 учитывает возможное определение одной характеристики прочности по другой на основании эмпирических формул и связанные с этим переходом неточности; M_2 — число изделий, подвергающихся проверочным испытаниям от партии; M_3 — влияние величины изделия на его прочность.

Дифференциальный метод дает несколько завышенные коэффициенты запаса прочности, так как основан на предположении, что на деталь или конструкцию действует одновременно вся совокупность неблагоприятных факторов, что маловероятно.

При расчете теплообменных аппаратов этот метод используют в упрощенном виде, так как некоторые из перечисленных факторов не имеют существенного значения.

В отношении расчета теплообменных аппаратов на прочность нет единых обязательных норм. Детали и узлы паровых котлов рассчитывают по «Нормам расчета элементов паровых котлов на прочность», обязательным для всех министерств и ведомств. Во многих случаях, в частности при расчете бойлеров, деаэраторов, нефтяной аппаратуры, используют формулы и допускаемые напряжения, принимаемые при расчете для котлов.

В расчете теплообменников химической промышленности имеется ряд специфических особенностей в выборе расчетных формул и допускаемых напряжений.

В настоящее время разрабатывают проект единых норм расчета на прочность сосудов и аппаратов независимо от области промышленности, в которой они должны работать. Проект этих единых норм во многих случаях совпадает с «Нормами расчета элементов паровых котлов на прочность», но область его применения для различных конструктивных элементов значительно шире.

Номинальные допускаемые напряжения $\sigma_{\text{доп}}^*$, кг/мм^2 , для сталей в зависимости от расчетной температуры стенки

а) Углеродистые стали

Марки сталей	Ст. 2	10 10К	Ст. 3	15 15К	Ст. 4	20 20К	25 25К	22К
$\sigma_{\text{в}}^{20}$, кг/мм^2	35	38	39	40	43	44	48	45
Температура стенки, °C								
20	11,7	12,0	13,0	13,3	14,3	14,7	16,0	15,0
200	10,5	10,9	11,7	12,1	12,8	13,3	14,0	14,0
240	9,7	10,0	10,7	11,1	11,7	12,2	13,4	13,3
260	9,3	9,6	10,8	10,6	11,1	11,6	12,7	12,9
280	8,9	9,2	9,8	10,1	—	11,1	12,1	12,5
300	8,5	8,8	9,4	9,7	—	10,5	11,5	12,2
320	—	8,3	—	9,2	—	10,0	11,0	11,8
340	—	7,9	—	8,7	—	9,5	10,4	—
360	—	7,5	—	8,2	—	9,0	9,8	—
380	—	7,1	—	7,7	—	8,5	9,2	—
400	—	6,7	—	7,3	—	8,0	8,7	—
410	—	6,5	—	7,1	—	7,7	8,4	—
420	—	6,3	—	6,9	—	7,5	8,1	—
430	—	5,9	—	6,5	—	7,3	7,5	—
440	—	5,2	—	5,8	—	6,3	6,7	—
450	—	4,6	—	5,2	—	5,6	5,9	—
460	—	4,1	—	4,6	—	4,9	5,1	—
470	—	3,6	—	4,1	—	4,3	4,6	—
480	—	3,2	—	3,7	—	3,8	3,9	—
490	—	2,8	—	3,3	—	3,3	3,4	—
500	—	2,5	—	3,0	—	3,0	3,0	—

б) Теплоустойчивые легированные стали

Марка сталей	16М	12МХ	15МХ	12ХМФ	12Х1МФ (по, ту 12ХМФ)	12Х2МФБ (Эи531)	1Х18Н12Т 1Х18Н9Т
$\sigma_{\text{в}}^{20}$, кг/мм^2	41	42	45	45	50	42	55
Температура стенки, °C							
20	13,3	14,0	15,0	15,0	16,5	14,0	13,0
250	12,4	12,8	13,8	13,8	14,5	13,0	12,2
300	11,9	12,6	13,3	13,3	14,0	—	12,0
350	11,7	12,3	12,6	12,6	13,3	—	11,8
400	11,0	11,6	12,0	12,0	12,6	—	11,6
420	10,6	11,3	11,7	11,7	12,3	—	11,3
440	10,2	11,0	11,5	11,5	12,1	—	11,0
460	9,8	10,8	11,3	11,3	11,8	—	10,7
480	8,5	10,5	11,0	11,0	11,5	—	10,3
500	6,6	8,4	9,0	9,7	11,3	7,3	10,0
510	—	7,2	7,8	8,7	10,5	6,6	9,9
520	—	6,0	6,8	8,0	9,4	6,0	9,8
530	—	5,0	6,0	7,4	8,3	5,5	9,6
540	—	4,1	5,2	6,6	7,4	5,0	9,4
550	—	(3,0)	4,4	5,8	6,5	4,6	9,2
560	—	—	3,7	(5,2)	5,9	4,2	9,0
570	—	—	(3,0)	—	5,2	3,9	8,5
580	—	—	—	—	4,6	3,6	7,8

Марка стали	16М	12МХ	15МХ	12ХМФ	12Х1МФ (по ТУ 12ХМФ)	12Х2МФБ (ЭИ531)	1Х18Н12Т 1Х18Н9Т
$\sigma_{\text{в}}^{20}$, кг/мм ²	41	42	45	45	50	42	55
Температура стенки, °С							
590	—	—	—	—	(4,0)	3,3	7,1
600	—	—	—	—	—	3,0	6,5
610	—	—	—	—	—	2,7	6,0
620	—	—	—	—	—	(2,4)	5,5
630	—	—	—	—	—	(2,1)	5,0
640	—	—	—	—	—	—	4,6
650	—	—	—	—	—	—	4,2
660	—	—	—	—	—	—	3,9
670	—	—	—	—	—	—	3,6
680	—	—	—	—	—	—	3,3
690	—	—	—	—	—	—	3,0
700	—	—	—	—	—	—	2,6

В табл. 3-1 приведены наиболее распространенные марки стали и допускаемые напряжения для них в зависимости от температуры согласно дополнениям к «Нормам расчета элементов паровых котлов на прочность».

В табл. 3-2 приведены допускаемые напряжения для некоторых цветных металлов в зависимости от рабочей температуры стенки.

Таблица 3-2

Допускаемые напряжения на растяжение для некоторых цветных металлов и сплавов в зависимости от температуры стенки

Медь отожженная прокатная		Латуни марок Л68, Л62 и ЛС59-1 отожженные и прокатанные		Мягкий алюминий	
Температура стенки, °С	Допускаемые напряжения, кг/мм ²	Температура стенки, °С	Допускаемые напряжения, кг/мм ²	Температура стенки, °С	Допускаемые напряжения, кг/мм ²
До 120	4,4	До 120	5,0	До 30	1,5
121—140	4,2	121—140	4,75	31—60	1,4
141—160	4,0	141—160	4,50	61—80	1,3
161—180	3,8	161—180	4,25	81—100	1,2
181—200	3,6	181—200	4,00	101—120	1,05
201—230	3,2	201—220	3,75	121—140	0,9
231—250	3,0	221—240	3,50	141—160	0,75
		241—250	3,25	161—180	0,6
				181—200	0,45

При использовании марок сталей, не вошедших в табл. 3-1, номинальные допускаемые напряжения $\sigma_{\text{доп}}^*$ устанавливаются в зависимости от темпера-

туры стенки и характеристик прочности стали. Номинальные допускаемые напряжения принимают равными наименьшей из следующих величин:

$$\sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{в}}^t}{n_{\text{в}}}; \quad (3-6)$$

$$\sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{т}}^t}{n_{\text{т}}}; \quad (3-7)$$

$$\sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{д}}^t}{n_{\text{д}}}; \quad (3-8)$$

здесь $\sigma_{\text{в}}^t$ — предел прочности при температуре стенки t ;

$\sigma_{\text{т}}^t$ и $\sigma_{\text{д}}^t$ — соответственно предел текучести и предел длительной прочности при той же температуре.

Условие (3-8) необходимо учитывать, если расчетная температура стенки превышает 420°С для углеродистых сталей, 470°С — для низколегированных сталей и 550°С — для сталей аустенитного класса. Для каждой марки стали возможны некоторые колебания величин пределов прочности, текучести и длительной прочности из-за колебаний химического состава, режима термической обработки и по другим причинам. При выборе номинальных допускаемых напряжений предел текучести и предел прочности принимают равными минимальным

значениям этих характеристик для стали данной марки.

Величины запаса прочности принимают по пределу прочности $n_B=3,0$ и по пределу текучести $n_T=1,65$.

Величина запаса прочности по пределу длительной прочности учитывает достоверность знаний о свойствах стали. Если расчетный предел длительной прочности определен по результатам испытания не менее трех плавок, то запас прочности принимают $n_D=1,65$. Если имеются данные только по двум плавкам данной стали, принимают $n_D=1,85$, по одной плавке $n_D=2,0$.

При расчете стальных теплообменных аппаратов химической промышленности коэффициенты запаса прочности обычно принимают по данным, приведенным в табл. 3-3.

Таблица 3-3

Значения коэффициентов запаса прочности при расчете стальных цилиндрических сосудов

Категория сосуда	Запас прочности	
	n_B	n_T
I, II, III	—	1,4—2,0
IV	4—4,25	1,7—1,8
V	3,5—4	—

Примечания. Указанные в таблице коэффициенты запаса прочности должны быть увеличены: на 50%, если давление и температура в сосуде могут повыситься в результате химических реакций; на 15% при расчете сосудов с огневым обогревом; на 15% при расчете кованых сосудов с фланцами; на 50% при расчете литых стальных сосудов.

При выполнении расчета необходимо учитывать, что толщина стенки теплообменного аппарата в процессе эксплуатации может уменьшаться из-за коррозии. Толщина прокорродировавшего слоя металла зависит в основном от состава и свойств теплоносителя и металла, а также от срока службы и не зависит от толщины стенки и напряжений в ней. Поэтому при расчете необходимой толщины стенки следует делать добавку на коррозию с учетом срока службы. В котельной технике принято вводить такую добавку, если скорость окисления превышает $0,05 \text{ мм/год}$.

В теплообменных аппаратах химической промышленности возможны резкие колебания температуры и давления в связи с протекающими в аппа-

ратах реакциями, поэтому коррозионная активность теплоносителей в ходе технологических процессов может сильно изменяться. Для этих аппаратов обычно принимают более высокие коэффициенты запаса прочности. При таком способе расчета добавка на коррозию вводится косвенно. В частности, при расчете аппаратов для выпаривания раствора NaOH величину запаса прочности по пределу прочности обычно принимают около четырех вместо трех, принятых в котельной технике.

Условия работы конструкции и степень достоверности расчетных форм согласно «Нормам расчета элементов паровых котлов на прочность» учитываются введением коэффициента η . Допускаемое напряжение получается путем умножения номинального допускаемого напряжения на величину коэффициента η

$$\sigma_{\text{доп}} = \eta \sigma_{\text{доп}}^*$$

Величины рекомендуемых значений коэффициента η приведены в табл. 3-4.

Таблица 3-4

Рекомендуемые величины поправочного коэффициента

Элементы	Величина коэффициента η
Сосуды бесшовные или сварные без отверстий или с отверстиями для приварки штуцеров:	
а) не обогреваемые горячими топочными газами	1,0
б) обогреваемые	0,9
Те же сосуды, но с отверстиями под развальцовку труб:	
а) не обогреваемые	0,95
б) обогреваемые	0,85
Трубы поверхностей нагрева	1,0
Трубопроводы	0,85
Дишца выпуклые:	
а) глухие	1,0
б) с лазами или другими укрепленными отверстиями	0,95
Донышки плоские приварные	0,8

Условия работы конструкции и достоверность расчетных формул можно учитывать непосредственно величиной коэффициента запаса прочности. Такая методика обычно применяется при расчете теплообменных аппаратов химической промышленности.

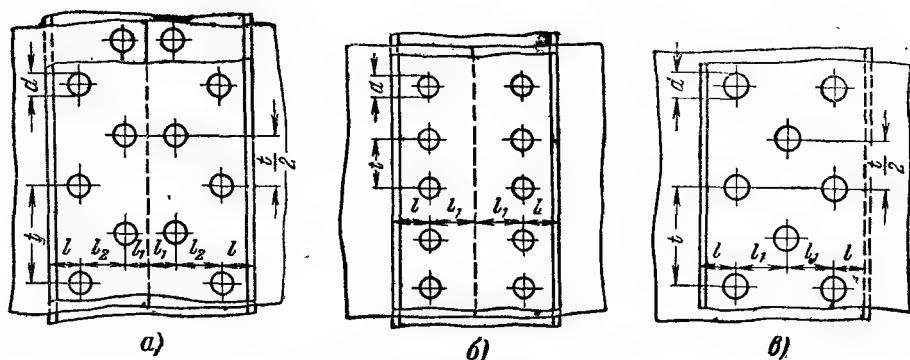


Рис. 3-2. Типы заклепочных соединений

а — двухрядный шов с двумя накладками; б — однорядный шов с двумя накладками; в — трехрядный шов внахлестку.

Теплообменные аппараты в настоящее время изготавливают сварными, однако в эксплуатации находится значительное количество клепаных конструкций. При проверочных расчетах клепаных сосудов величину поправочного коэффициента принимают в соответствии с табл. 3-5.

Таблица 3-5

Значения поправочного коэффициента η для различных типов заклепочных швов

Тип заклепочного шва	Поправочный коэффициент η
Швы с двусторонними накладками с двумя и более рядами заклепок	0,83
Швы с двусторонними накладками с одним рядом заклепок, а также швы с двусторонними накладками, из которых одна имеет два ряда заклепок, а другая — один	0,78
Швы с односторонней накладкой и швы внахлестку	0,70

Типы заклепочных соединений показаны на рис. 3-2.

3-3. РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ НА ПРОЧНОСТЬ

Рассмотрим случай, когда цилиндрический сосуд работает под внутренним давлением, одинаковым во всех его точках. Металл стенки сосуда находится в объемном напряженном состоянии. В направлении радиуса сосуда действуют радиальные сжимающие напряжения σ_r , вдоль оси — осевые растягивающие напряжения σ_z ,

по направлению касательной к поверхности цилиндра — тангенциальные нормальные растягивающие напряжения σ_t . Нормальные тангенциальные, осевые и радиальные напряжения являются главными, т. е. по площадкам, по которым действуют эти напряжения, нет касательных напряжений.

Найдем величины главных напряжений для тонкостенного цилиндрического сосуда. У таких сосудов отношение наружного диаметра к внутреннему равно или меньше 1,2. Средние величины главных напряжений можно получить, если рассмотреть равновесие отдельных частей сосуда.

Вырежем мысленно из сосуда кольцо длиной в 1 м. Половины этого кольца (рис. 3-3) будут отрываться одна от другой силой, создаваемой внутренним давлением. Эта сила равна:

$$pD_b l \text{ [кг]},$$

где p — внутреннее избыточное давление в сосуде, кг/см^2 ;
 D_b — внутренний диаметр сосуда, см ;
 l — длина кольца, см .

Усилия от внутреннего давления уравниваются тангенциальными нормальными напряжениями в стенке сосуда

$$2\sigma_t s l \text{ [кг]},$$

где s — толщина стенки сосуда, см ;
 σ_t — тангенциальное нормальное напряжение, кг/см^2 , откуда

$$\sigma_t = \frac{pD_b}{2s}. \quad (3-9)$$

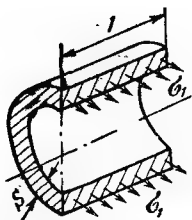


Рис. 3-3. Определение среднего тангенциального напряжения.



Рис. 3-4. Определение среднего осевого напряжения.

Сила давления на днища сосуда создает в перпендикулярном сечении также растягивающие нормальные напряжения

$$p = \frac{\pi D_B^2}{4} \cdot s.$$

Эта сила уравновешивается напряжениями в том же сечении стенки сосуда (рис. 3-4). Так как в рассматриваемом случае толщина стенки сосуда мала по сравнению с его диаметром, можно принять, что средний диаметр равен внутреннему и уравновешивающая сила равна:

$$\sigma_z \pi D_B s.$$

Следовательно,

$$\sigma_z = \frac{p D_B}{4s}. \quad (3-10)$$

Из сравнения формул (3-9) и (3-10) видно, что тангенциальные напряжения в тонкостенном сосуде в 2 раза больше осевых.

Радиальное напряжение на внутренней поверхности равно внутреннему давлению, на наружной поверхности — нулю. Среднее радиальное напряжение равно:

$$\sigma_r^{\text{средн}} = -\frac{p}{2}. \quad (3-11)$$

Для пластичных материалов (сталь, латунь, медь, дюралюминий и т. п.), из которых изготовляют большинство сосудов, хорошее совпадение с экспериментом дает энергетическая теория прочности, согласно которой условие прочности выражается следующим образом:

$$\sigma_{\text{доп}} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \times$$

$$\times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (3-12)$$

здесь σ_1 , σ_2 и σ_3 — главные напряжения.

В рассматриваемом случае $\sigma_1 = \sigma_t$, $\sigma_2 = \sigma_z$ и $\sigma_3 = \sigma_r$. Подставив значения главных напряжений из формул (3-9), (3-10) и (3-11) в условие прочности (3-12), после несложных преобразований получим:

$$\frac{16}{3} \frac{\sigma_{\text{доп}}^2}{p^2} = \left(\frac{D_B}{s} + 1 \right)^2 + \frac{1}{3}. \quad (3-13)$$

Так как внутренний диаметр сосуда намного больше толщины стенки, величиной $1/3$ в правой части уравнения (3-13) можно пренебречь. Решая далее уравнение (3-13) относительно толщины стенки сосуда, получаем:

$$s = \frac{D_B p}{2,3 \sigma_{\text{доп}} - p}.$$

Так как избыточное давление в сосуде измеряется обычно в кг/см^2 , а допускаемое напряжение в кг/мм^2 , получим с учетом различия в размерностях:

$$s = \frac{D_B p}{230 \sigma_{\text{доп}} - p}.$$

Величину внутреннего диаметра и толщину стенки по этой формуле берут в миллиметрах.

Внутренние диаметры стальных судов и аппаратов, проектируемых для химической, нефте-химической и пищевой промышленности согласно ГОСТ 9617-61 должны выбираться из нормального ряда.

Для стальных судов и аппаратов, изготавливаемых из листа, можно принимать номинальные внутренние диаметры в интервале от 400 до 1 200 мм через каждые 100 мм, а в интервале от 1 200 до 4 000 мм — через каждые 200 мм. Номинальные внутренние диаметры для судов диаметром менее 400 мм и более 4 000 мм стандартом не устанавливаются.

Для сосудов и аппаратов, изготавливаемых из цветных металлов и сплавов в интервале от 100 до 1 000 мм можно выбирать номинальные внутренние диаметры через каждые 50 мм, в интервале от 1 000 до 1 500 мм через каждые 100 мм, далее до 2 000 мм через каждые 200 мм.

ГОСТ 9617-61, введенный с 1 июля 1961 г., устанавливает также номинальные наружные диаметры для сосудов, изготавливаемых из труб. Он не

распространяется на резервуары, газ-гольдеры и опытные установки.

Введение этого стандарта позволит унифицировать оснастку заводов, изготовляющих теплообменные аппараты нефтяной, химической и пищевой промышленности.

Сосуды изготовляют из листов и труб, толщина стенки которых всегда отличается от номинального размера в ту или другую сторону.

В дальнейшем принимаются во внимание только отклонения в сторону уменьшения толщины листа, приводящие к ослаблению стенки сосуда. Такие отклонения не должны выходить за определенный предел — минусовый допуск. По различным техническим условиям минусовый допуск на толщину стенок труб колеблется от 5 до 20% номинальной толщины. Чтобы компенсировать возможное ослабление стенки сосуда, к расчетной толщине стенки добавляют величину C .

С учетом этого формула (3-13) принимает следующий вид:

$$s = \frac{D_b p}{230 \sigma_{\text{доп}} - p} + C. \quad (3-14)$$

При проверочных расчетах определяют величину допускаемого давления в сосуде

$$d = \frac{230(s - C) \sigma_{\text{доп}}}{D_b + (s - C)}, \quad (3-15)$$

или величину возникающего приведенного напряжения

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{p[D_b + (s - C)]}{230(s - C)} \quad (3-16)$$

Приведенное напряжение должно быть меньше допускаемого или равно ему. Величину C для труб принимают по формуле

$$C = A(s - C).$$

Значения коэффициента A принимают по табл. 3-6.

Таблица 3-6

Значения коэффициента A в зависимости от минусового допуска на толщину стенки сосуда, изготовленного из трубы

Минусовый допуск на толщину стенки, %	—15	—10	—5
Величина коэффициента A	0,18	0,11	0,05

Во всех случаях величина C для сосудов, изготовленных из труб, должна быть не меньше 0,5 мм.

Для корпусов, изготовляемых из листов, величину C принимают равной 1 мм при расчетной толщине листа менее 20 мм или нулю, если расчетная толщина больше 20 мм. При изготовлении сосудов путем отливки из стали величина C принимается равной минусовому технологическому допуску на толщину стенки, увеличенному на 2 мм.

При проектировании аппаратов расчетную толщину стенки иногда увеличивают в предположении коррозии (для нефтяной аппаратуры на 2—6 мм).

При расчете тонкостенных сосудов из хрупких материалов, например из серого чугуна, следует пользоваться теорией максимальных нормальных напряжений. Расчетная формула для этого случая выражается следующим образом:

$$s = \frac{D_b p}{200 \sigma_{\text{доп}}} + C. \quad (3-17)$$

Формула (3-17) получена из формулы (3-9) путем замены тангенциального нормального напряжения допускаемым и решения формулы (3-9) относительно s .

Для проверочных расчетов применяют формулы

$$p = \frac{200 \sigma_{\text{доп}}(s - C)}{D_b};$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{D_b p}{200(s - C)}.$$

Давление в сосуде не должно быть более получаемого по первой из этих формул. Приведенное напряжение должно быть меньше допускаемого или равно ему.

Формулу (3-17) используют также для расчета теплообменных аппаратов, работающих под избыточным внутренним давлением до 20—25 атм. Расчет по формуле (3-17) несколько проще, чем по формуле (3-14).

Если вертикальный аппарат имеет тонкостенный корпус, на который передается нагрузка от собственного веса и веса находящегося в нем теплоносителя или обрабатываемого материала, то необходимо проверить прочность сосуда в поперечном сечении.

В случаях, когда суммарные растягивающие напряжения от давления и собственного веса в поперечном сечении не превышают растягивающего напряжения от внутреннего давления в продольном сечении, дополнительной проверки не требуется, т. е. должно быть выполнено условие

$$\frac{pD_B}{4s} + \frac{G}{\pi D_B s} \leq \sigma_{\text{доп}},$$

где G — вес находящихся в сосуде материалов и части сосуда ниже опор, кг.

Если суммарные напряжения превышают допускаемое, то прочность сосуда следует проверить по формуле

$$\sigma_{\text{доп}} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

и принять конструктивные меры, чтобы это условие было выполнено.

3.4. РАСЧЕТ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ НА ПРОЧНОСТЬ

Рассмотрим распределение напряжений по толщине стенки толстостенного цилиндрического сосуда. У таких сосудов отношение наружного диаметра к внутреннему превышает 1,2.

Вывод формул, по которым определяют распределения напряжений по толщине стенки сосуда, дается в курсах теории упругости и сопротивления материалов, поэтому здесь он не приводится.

Обозначим внутренний и наружный радиусы r_B и r_H соответственно, а текущий радиус, т. е. любой радиус от r_B до r_H включительно, r .

При принятых обозначениях получим:

$$\sigma_t = \frac{pr_B^2 \left(1 + \frac{r_H^2}{r^2} \right)}{r_H^2 - r_B^2}; \quad (3-18)$$

$$\sigma_z = \frac{pr_B^2}{r_H^2 - r_B^2}; \quad (3-19)$$

$$\sigma_r = - \frac{pr_B^2 \left(1 - \frac{r_H^2}{r^2} \right)}{r_H^2 - r_B^2}. \quad (3-20)$$

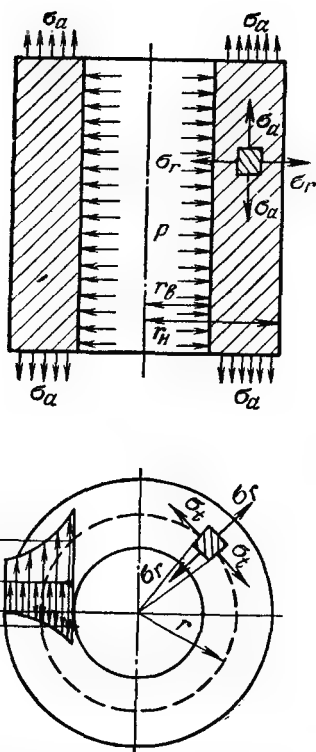


Рис. 3-5. Распределение напряжений в толстостенной трубе.

Подставляя вместо r конкретные значения текущего радиуса, можно получить величину напряжений в любой точке толстостенной трубы, подверженной внутреннему давлению. Распределение напряжений по толщине стенки показано на рис. 3-5. Как видно из рисунка, радиальное и тангенциальное напряжения достигают максимальной величины на внутренней поверхности толстостенного цилиндра, а осевое одинаково по всей толщине стенки. Следовательно, наиболее опасное напряженное состояние получается на внутренней поверхности сосуда.

Как показали эксперименты английского физика П. В. Бриджмена, при нагружении толстостенного сосуда, изготовленного из пластичного металла, возрастающим внутренним давлением в пластическое состояние в первую очередь переходит металл на внутренней поверхности. Далее, по мере нагружения в пластическое состояние переходят другие слои металла. В ходе пластического течения относительные деформации на наружной поверхности постепенно становятся боль-

ше деформации внутренних слоев и разрушение начинается по наружной поверхности. Переход в пластическое состояние металла внутренних слоев трубы при сохранении упругости наружных слоев не представляет опасности. Опасен случай, когда все сечение окажется в пластическом состоянии. Давление, вызывавшее переход металла в пластическое состояние по всему сечению трубы, называется предельным. При достижении предельного состояния тангенциальные напряжения выравниваются по толщине стенки трубы.

Исходя из процесса развития пластической деформации, можно считать, что расчет по усредненным значениям напряжений допустим и для толстостенных сосудов. Это справедливо также при высоких температурах, когда металл работает в области ползучести: в процессе ползучести происходит перераспределение напряжений по толщине стенки и пики напряжений на внутренней поверхности сглаживаются — происходит практически полное выравнивание напряжений по толщине стенки. Следовательно, для толстостенных сосудов можно пользоваться формулой (3-14). Она дает хорошее совпадение с экспериментальными значениями предельных давлений до отношения наружного диаметра сосуда к внутреннему, равного 1,5. При расчете толстостенных сосудов по формуле (3-14) используют метод предельных нагрузок.

3-5. УЧЕТ ОСЛАБЛЕНИЯ СТЕНОК СОСУДОВ ОТВЕРСТИЯМИ

Корпуса теплообменных аппаратов, промежуточные емкости, сборные и раздающие камеры могут иметь ослабление стенок одним рядом или несколькими рядами отверстий. В этом случае расчет цилиндрической стенки производят по формуле

$$s = \frac{D_{в} p}{230 \varphi \sigma_{доп} - p} + C. \quad (3-22)$$

В этой формуле коэффициент прочности φ учитывает ослабление камеры отверстиями. Формула обязательна при расчете камер и барабанов паровых котлов по «Нормам расчета элементов паровых котлов на проч-



Рис. 3-6. Коридорное расположение отверстий в сосудах.

ность», утвержденным Госгортехнадзором СССР, и рекомендуема при расчете других сосудов, работающих под внутренним давлением.

Отверстия в сосудах могут располагаться в коридорном (рис. 3-6) или шахматном порядке (рис. 3-7).

Коэффициент прочности цилиндрического сосуда в продольном направлении при ослаблении его одним или несколькими рядами коридорно расположенных отверстий одинакового диаметра с постоянным шагом между центрами отверстий принимается равным.

$$\varphi = \frac{t-d}{t},$$

где t — шаг между центрами отверстий в продольном направлении, мм;
 d — диаметр отверстия, мм.

Для коридорного расположения отверстий одинакового диаметра с постоянным шагом в поперечном направлении коэффициенты прочности определяются по формуле

$$\varphi_1 = \frac{t_1 - d}{t_1};$$

здесь t_1 — шаг между центрами отверстий в поперечном направлении по среднему диаметру сосуда, мм.

Коэффициенты прочности φ и φ_1 определяются как отношение площади сечения, ослабленного отверстиями, к неослабленному сечению, т. е. расчет

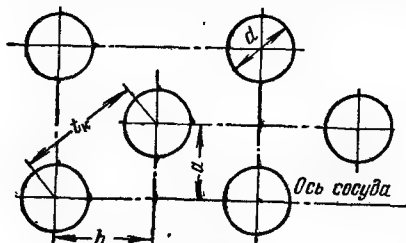


Рис. 3-7. Шахматное расположение отверстий в сосудах.

ведется по средним напряжениям в мостиках между отверстиями.

Если сосуд ослаблен отверстиями с чередующимися по величине диаметрами, величина d в приведенных выше формулах принимается равной среднеарифметической из значений этих диаметров:

$$d = 0,5 (d_1 + d_2).$$

При коридорном расположении отверстий в формулу (3-22) подставляется наименьшая из двух величин: φ или $2\varphi_1$. Коэффициент прочности в поперечном направлении умножают на два, так как напряжение в поперечном направлении в 2 раза меньше, чем в продольном.

Шахматное расположение отверстий и принятые для него обозначения показаны на рис. 3-7. Коэффициент прочности для диагонального мостика определяется по формуле

$$\varphi_k = \frac{t_k - d}{t_k}.$$

Шаг в диагональном направлении берется по среднему диаметру. Коэффициент прочности в косом мостике, приведенный к продольному направлению,

$$\varphi_{пр} = k\varphi_k,$$

где

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,75}{(1+n^2)^2}}}. \quad (3-23)$$

В этой формуле

$$n = \frac{b_1}{a}.$$

Величина коэффициента k может быть определена по рис. 3-8.

Метод приведения коэффициента прочности в косом направлении к эквивалентному коэффициенту в продольном направлении, использованный в нормах, основан на допущении о равенстве напряжений по длине и толщине мостика между отверстиями и на третьей теории прочности¹. При выводе формулы для перевода коэффициента прочности косого мостика к эквивалентному коэффициенту для продольного мостика, так же как и при выводе коэффициентов прочности для

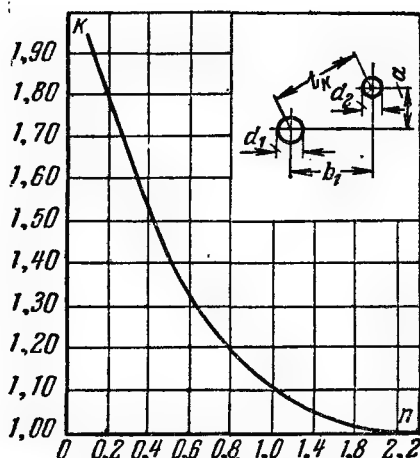


Рис. 3-8. Определение коэффициента k .

продольных и поперечных коридорных мостиков, не было учтено радиальное напряжение. При работе металла сосуда в упругой области имеет место также концентрация напряжений около отверстий.

Если сосуд имеет ослабление нескольких видов, то в формулу (3-22) подставляют меньшую из величин φ , $2\varphi_1$ или $\varphi_{пр}$. Значения φ , φ_1 или $\varphi_{пр}$ менее 0,3 не допускаются. В случае, когда ослабления состоят только из двух отверстий, коэффициенты прочности определяются следующим образом:

$$\varphi = \frac{t - d}{t - 0,6d};$$

$$\varphi_1 = \frac{t_1 - d}{t_1 - 0,3d};$$

$$\varphi_k = \frac{t_k - d}{t_k - 0,4d}.$$

По этим формулам коэффициенты прочности для двух отверстий получаются большими, чем для ряда отверстий.

Повышенные коэффициенты прочности для случая двух отверстий, значительно превышающие коэффициенты для случая ряда отверстий, учитывают укрепляющее влияние на одиночный мостик со стороны металла по ту сторону отверстия, где мостика нет.

А. Э. Данюшевским (ЦКТИ) предложена формула для определения коэффициентов прочности мостиков на основе четвертой теории прочности² при условии усреднения напряжений

¹ Теория максимальных касательных напряжений.

² Энергетическая теория прочности.

по толщине стенки и длине мостика. Эти допущения вполне правомерны. Хотя распределение напряжения по толщине и глубине мостика в упругой области неравномерно, достаточно небольших пластических деформаций, чтобы напряжения практически выравнялись. Около отверстий металл переходит в пластическое состояние несколько раньше, чем в середине мостика. После пластической деформации металла мостика порядка десятых долей процента можно считать, что произошло выравнивание напряжений по длине мостика.

Формула для определения коэффициентов прочности, полученная на основе четвертой теории и допущения о равномерности распределения напряжений, имеет следующий вид:

$$\varphi_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\beta^2 + \beta + 1}{\frac{1}{m_1^2} \left[\frac{4m_{\text{II}}^2}{\varphi_k^2} + 4m_{\text{III}}\varphi_k^2 - 4m_{\text{II}}m_{\text{III}} + \frac{3m^2}{\varphi_k^2} \right] + \frac{2(\beta - 1)}{m_1} \left[\frac{m_{\text{II}}}{\varphi_k} + m_{\text{III}}\varphi_k \right] + (\beta - 1)^2}}, \quad (3-24)$$

где

$$m = \frac{a}{b}, \quad m_1 = m^2 + 1, \quad m_{\text{II}} = 1 + \frac{m^2}{2}$$

и

$$m_{\text{III}} = \frac{1}{2} + m^2.$$

Расчет коэффициентов прочности по этой формуле очень трудоемок. На основе формулы (3-24) автором настоящего раздела построена номограмма (рис. 3-9), по которой определение коэффициентов прочности не представляет труда.

Коэффициент прочности находят по номограмме следующим образом. По вспомогательной номограмме, помещенной в правом верхнем углу, исходя из известных величин φ_k и m , определяют коэффициент A . Точка пересечения кривых постоянных значений φ_k с соответствующей ординатой m сносится по горизонтали вправо на шкалу A . По известным величинам A и β в правом нижнем углу номограммы находят точку пересечения соответствующих кривых и отмечают ее. Далее, по сетке, помещенной в левой части номограммы, находят точку пересечения кривых постоянных значений φ_k с ординатой m и сносят ее вправо по

горизонтали на безразмерную шкалу. Эту точку на безразмерной шкале соединяют прямой линией с отмеченной ранее точкой пересечения кривых для A и β в правом нижнем углу номограммы. На пересечении прямой линии со шкалой $\varphi_{\text{пр}}$ читают результат.

В МЭИ были исследованы напряжения и переход в пластическое состояние камер паровых котлов с различными вариантами расположения рядов отверстий. Исследование показало хорошее совпадение экспериментальных предельных давлений и расчетных величин, определенных по энергетической теории прочности.

3-6. УКРЕПЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДАХ

Неукрепленными считаются отверстия под развальцовку, под резьбу,

а также отверстия, уплотненные лазовыми лючками или иными затворами, но не имеющие укрепления по контуру. Неукрепленные отверстия и вырезы ослабляют стенку тем больше, чем больше их диаметр.

Наибольший диаметр неукрупненных отверстий в элементах паровых котлов по «Нормам» не должен превышать величины, определенной по следующей эмпирической формуле:

$$d_{\text{пред}} = 8,1 \sqrt[3]{D_b(s - C)(1 - K)} [\text{мм}].$$

Коэффициент K определяют из выражения

$$K = \frac{pD_b}{(230\sigma_{\text{доп}} - p)(s - C)}.$$

В сосудах, работающих под давлением, не допускается массовая сверловка отверстий для приварки штуцеров или развальцовки труб, если расстояние от центров отверстий до середины сварного шва менее 0,9 диаметра отверстия. В сварных швах можно сверлить лишь одиночные отверстия диаметром не более 150 мм, с шагом не менее двух диаметров.

В теплообменных аппаратах нефтеперерабатывающей промышленности

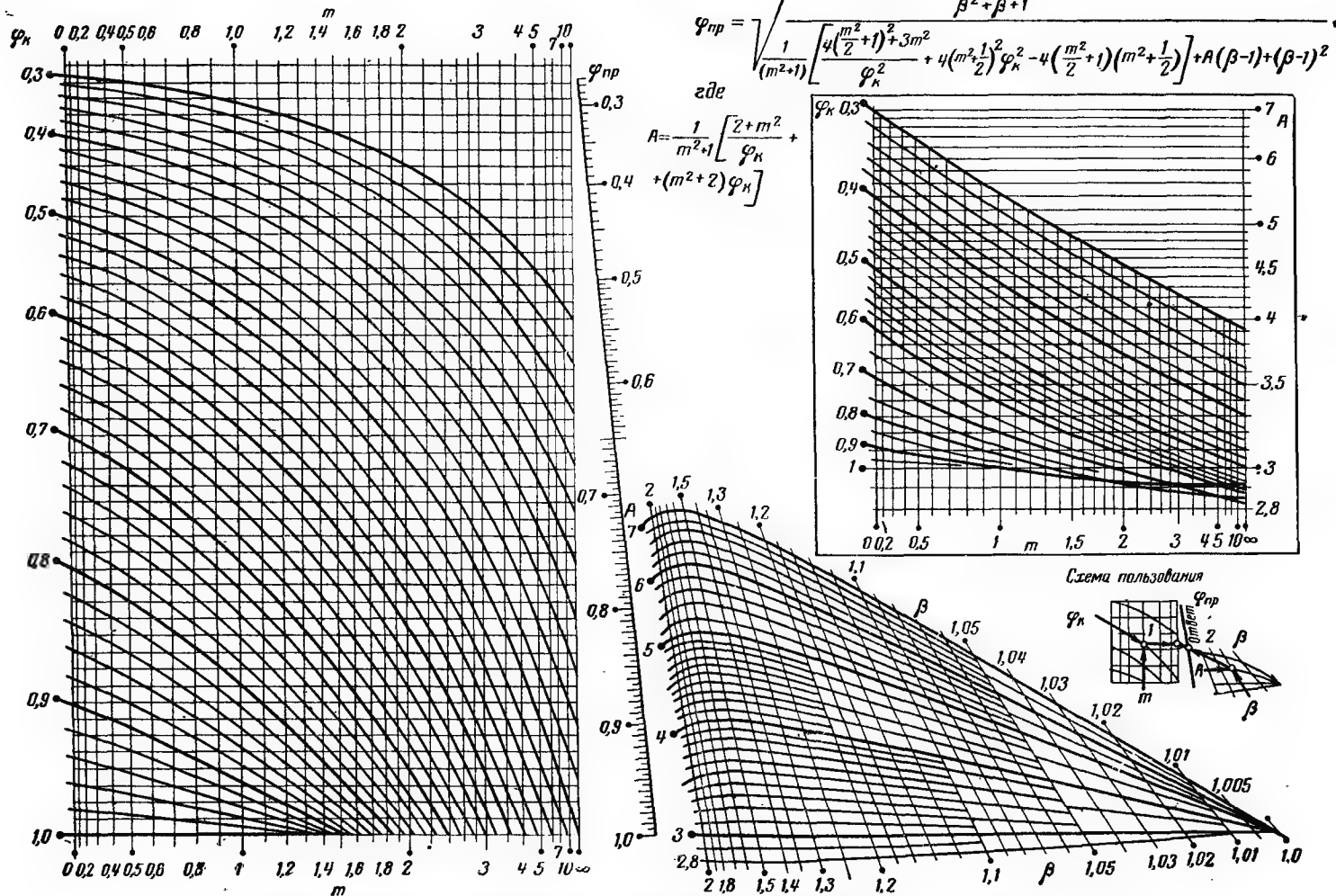


Рис. 3-9. Номограмма для определения коэффициентов прочности (по энергетической теории).

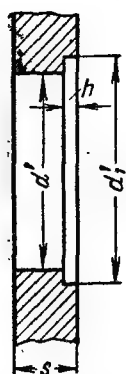


Рис. 3-10. Схема подрезки кромок у лючкового отверстия.

принято укреплять отверстие, если внутренний диаметр патрубка превышает 50 мм, в некоторых случаях даже менее 50 мм. Укрепление производят в тех случаях, когда аппарат подвержен резким колебаниям давления, когда центры отверстий находятся один от другого на расстоянии менее суммы их диаметров или когда отверстие расположено на поперечном сварном шве.

Если отверстия имеют различные диаметры по толщине стенки сосуда (рис. 3-10), то расчетный диаметр отверстия выбирают по формуле

$$d_y = d' + \frac{h}{s}(d'_1 - d').$$

Если выточки в стенке сосуда сделаны для центровки приварных штуцеров (рис. 3-11), то за условный диаметр берут диаметр отверстия без учета ступенек.

Если отверстие имеет наибольший размер в свету, превышающий предельно допустимое значение диаметра неукрепленного отверстия, то такое отверстие должно быть укреплено усиленным штуцером или накладками, надежно соединенными с телом сосуда. Укрепление усиливает сечение вокруг отверстия и компенсирует ослабление поперечного сечения из-за удаления металла при вырезке отверстия. Усиливающие накладки не должны быть чрезмерно широкими, так как только часть их, расположенная на расстоянии не более диаметра отверстия от его центра, укрепляет отверстие. Площадь сечения укрепляющего элемента должна быть больше или

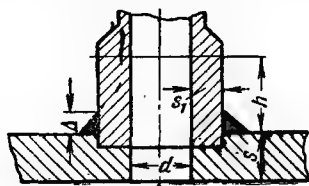


Рис. 3-11. Укрепление отверстия в сосуде при помощи толстостенного штуцера.

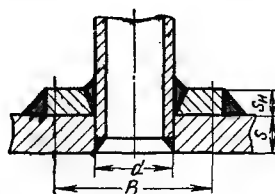


Рис. 3-12. Укрепление отверстия в сосуде при помощи накладок.

равна площади сечения металла, удаленного из отверстия.

Укрепление отверстия при помощи толстостенного штуцера показано схематически на рис. 3-11. В расчете независимо от действительной величины h учитывают наименьшую из двух величин $h \leq 2,5s_1$ или $h \leq 2,5s$, так как только она оказывает укрепляющее действие.

Укрепляющие накладки могут быть внешними и внутренними. Укрепление отверстия при помощи внешней накладки показано на рис. 3-12. В расчет вводят величину $B \leq 2d$.

В случае укрепления отверстий при помощи толстостенных штуцеров должно быть выдержано условие

$$\Delta^2 + 2h \left(s_1 - \frac{pd}{230\sigma_{\text{доп}} - p} \right) + d(s - s_0) \geq ds_0, \quad (3-25)$$

где s_0 — рассчитанная толщина стенки цельного (не имеющего ослаблений) сосуда, мм;

s — действительная толщина стенки сосуда с учетом ослаблений, имеющихся в другом месте сосуда, мм.

Неравенство (3-25) выведено из условия равнопрочности на основе первой теории прочности без учета концентрации напряжений. Правая часть неравенства, умноженная на величину тангенциального напряжения, представляет силу, которую воспринимал бы металл, удаленный из отверстия. Левая часть, умноженная на тангенциальное нормальное напряжение, представляет величину компенсирующей силы. Если принять, что в обоих случаях допускаются одинаковые и равномерно распределенные напряжения, то площадь сечения усиливающих элементов должна быть больше или равна площади сечения удаленного металла.

Первое слагаемое — Δ^2 — удвоенная площадь поперечного сечения металла сварного шва, катет которого равен Δ . Площадь поперечного сечения шва составляет $0,5 \Delta^2$. В рассматриваемое сечение сварной шов попадает дважды, поэтому площадь его сечения берется удвоенной.

Укрепляющий толстостенный штуцер должен воспринимать также нагрузку от внутреннего давления. Выражение в скобках

$$\left(s_1 - \frac{pd}{230\sigma_{\text{доп}} - p} \right)$$

показывает часть толщины стенки штуцера, обеспечивающую укрепление. В этом выражении из общей толщины стенки штуцера вычитается часть его толщин, необходимая для обеспечения прочности штуцера под действием внутреннего давления. Металл штуцера укрепляет отверстие только на высоте h ; таких укрепляющих участков в рассматриваемом сечении два.

Третье слагаемое учитывает укрепление за счет увеличения толщины стенки сосуда в месте выреза отверстия по сравнению с толщиной стенки сосуда без ослаблений. Действительная толщина стенки может быть больше рассчитанной из условия прочности сосуда без ослаблений, так как в других местах этого сосуда могут быть ослабления рядами отверстий, сварным швом и др.

Левая часть неравенства (3-25) учитывает металл, удаление которого вызвало ослабление сосуда.

Изложенная методика расчета укрепления одиночных отверстий рекомендуется «Нормами расчета элементов паровых котлов на прочность».

Экспериментальные исследования, проведенные в МЭИ, позволяют рекомендовать несколько иную методику расчета. Результаты исследования показали, что расчетная высота укрепляющего пояса штуцера определяется выражением

$$h = 3,46 r_{\text{ш}} \sqrt{\frac{1,25\beta_r - 1}{1,25\beta_r + 1}} [\text{мм}],$$

где $r_{\text{ш}}$ — средний радиус штуцера, мм (полусумма наружного и внутреннего радиусов);

β_r — отношение наружного радиуса сосуда к внутреннему.

Для укрепления до равнопрочности необходимо, чтобы $\frac{\beta_{\text{шт}}}{\beta_r} \geq 1,25$, где $\beta_{\text{шт}}$ —

отношение наружного диаметра укрепляющего штуцера к внутреннему. Толщина стенки штуцера выбирается так, чтобы выдержать это условие.

В случае укрепления отверстия при помощи внешней или внутренней накладки для обеспечения равнопрочности согласно нормам должно быть выдержано условие

$$s_n(B - d) + d(s - s_0) \geq ds_0. \quad (3-26)$$

Усиливающие накладки не должны быть чрезмерно широкими, так как только часть их, расположенная на расстоянии не более диаметра отверстия от его центра, укрепляет отверстие. Поэтому и введено ограничение $B \leq 2d$, которое проверено экспериментально.

Неравенства (3-25) и (3-26) справедливы при изготовлении укрепляющих элементов из стали таких же характеристик прочности, как сталь укрепляемых элементов. Если накладки выполняют из более прочного материала, то в расчете это не учитывают. При проектировании теплообменных аппаратов химической и нефтеперерабатывающей промышленности расчет укреплений отверстий при помощи накладок выполняют по «Нормам расчета элементов паровых котлов на прочность».

На рис. 3-13 показаны варианты узла приварки усиливающей накладки к корпусу сосуда и к патрубку, относящиеся к случаям, когда $s \leq 12$ мм. На рис. 3-13,а показан патрубок, доступный для сварки как изнутри, так и снаружи сосуда. Для облегчения технологии изготовления выступающий конец патрубка оставляют внутри сосуда. Если это нельзя допустить по требованиям технологического процесса, то выступающий конец патрубка срезают с внутренней стороны (рис. 3-13,б). Конструкция узла накладки, доступной для сварки только снаружи, показана на рис. 3-13,в.

Согласно «Правилам устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» для про-

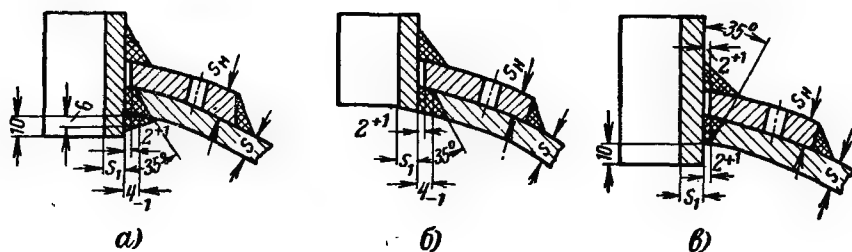


Рис. 3-13. Варианты узла приварки усиливающей накладки к корпусу сосуда и патрубку.
 а — патрубок доступен для сварки изнутри и снаружи сосуда; б — выступающий внутрь сосуда конец патрубка срезан путем механической обработки; в — накладка доступна для сварки только снаружи.

верки качества приварки колец, укрепляющих отверстия люков, лазов и штуцеров, в кольцах делают сигнальные отверстия с резьбой. Отверстие можно просверливать и в стенке сосуда с накладкой, приваренной с внутренней стороны. В отверстие вворачивают патрубок, через который подают сжатый воздух. Швы перед испытанием смачивают мыльной водой; при наличии неплотностей образуются пузыри.

Сигнальное отверстие позволяет также обнаруживать в процессе эксплуатации малейшие нарушения герметичности, так как продукт, проникающий через неплотности, выходит через отверстие и может быть легко обнаружен.

При расчете сварного шва, крепящего наладку к сосуду, обычно учитывают только наружный шов, принимая, что внутренний шов увеличивает запас прочности. Через внешний шов, работающий на срез, передается усилие от укрепляющих элементов. При этом усилие, воспринимаемое швом, равно:

$$P = \sigma_{\text{доп}} s_0 d.$$

Прочность шва для половинки кольца может быть определена по формуле

$$P_1 = \frac{\pi D_k}{2} 0,7 h_{\text{св}} \varphi_{\text{св}} 0,8 \sigma_{\text{доп}},$$

где D_k — диаметр наружного контура накладки, мм;

0,7 — коэффициент, учитывающий, что срез произойдет по самому тонкому сечению сварного шва, составляющему $0,7 h_{\text{св}}$;

$\varphi_{\text{св}}$ — коэффициент прочности сварного шва;

$0,8 \sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение на срез, принимаемое равным 0,8 допускаемого напряжения при растяжении.

Из условия равенства усилий, воспринимаемых сварным швом, и прочности шва получим высоту катета сварного шва

$$h_{\text{с}} = \frac{s_0 d}{0,88 D_{\text{квсв}}}. \quad (3-27)$$

Чаще всего высоту катета по конструктивным соображениям принимают равной толщине накладки и проверяют по формуле (3-27).

3-7. УЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ИЗГИБА ПРИ РАСЧЕТЕ НА ПРОЧНОСТЬ

Если ось цилиндрического сосуда горизонтальна, а расстояние между опорами в 4 или более раза превышает его диаметр, то прочность сосуда проверяют на изгиб от собственного веса и веса теплоносителя или обрабатываемого материала. Величина напряжений от изгиба определяется по формуле

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{M}{100 W},$$

где $\sigma_{\text{н}}$ — нормальное напряжение от изгиба, кг/мм²;

M — максимальный изгибающий момент, кг/см;

W — момент сопротивления цилиндрической части аппарата, см³.

Прочность проверяют в том сечении, где изгибающий момент имеет максимальную величину, и в том, где момент сопротивления имеет минимальную величину. При определении момента сопротивления сосуда, ослабленного лазом или отверстиями, положение центра тяжести сечения

определяется с учетом возможного несимметричного расположения отверстий и лазов относительно главных осей симметрии (центр тяжести сечения может не совпадать с его геометрическим центром).

Если величина напряжений от изгиба $\sigma_{\text{и}}$ не удовлетворяет условию

$$\sigma_z + \frac{\sigma_{\text{и}}}{1,4} \leq \sigma_{\text{доп}}$$

[здесь σ_z — продольное (аксиальное) напряжение от внутреннего давления, кг/мм^2 ; $\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение, кг/мм^2], необходимо осуществить конструктивные мероприятия, снижающие эти напряжения до допустимых пределов.

Горизонтальный цилиндрический корпус теплообменного аппарата может получить вмятины из-за потери устойчивости, опасность образования которых сильно возрастает при приложении сосредоточенных сил в сжатой зоне. Вмятины образуются в этой зоне, когда напряжения в ней превысят критическую величину (рис. 3-14). При расчете аппаратов нефтеперерабатывающей и химической промышленности для определения величины критических напряжений используют формулу, предложенную П. А. Филоновым,

$$\sigma_{\text{кр}} = 1,37E \left(\frac{s - C}{r_{\text{н}}} \right)^2,$$

где $\sigma_{\text{кр}}$ — критическое напряжение, кг/мм^2 ;

E — модуль упругости первого рода, кг/мм^2 (при температуре стенки сосуда);

s — толщина стенки аппарата, мм ;

C — поправка на коррозию и минусовый допуск;

$r_{\text{н}}$ — наружный радиус аппарата, мм .

Допускаемое напряжение принимают в 2,5 раза меньше критического.

Для повышения устойчивости аппарата применяют кольца жесткости. Укреплять сосуд кольцами жесткости надо так, чтобы расстояние между кольцами было меньше длины волны вмятины $l_{\text{кр}}$. Длину волны вмятины (в мм) можно определить из выражения

$$l_{\text{кр}} = 1,009\pi r_{\text{н}}.$$

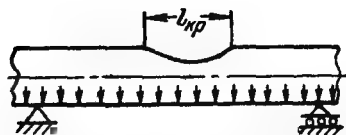


Рис. 3-14. Потеря устойчивости цилиндрическим горизонтальным сосудом.

При укреплении аппарата кольцами жесткости с расстоянием между ними меньше критического, величина критического напряжения возрастает. Она может быть найдена по формуле

$$\sigma'_{\text{кр}} = 0,0605Es^2 \left(\frac{9}{8} \frac{l^2}{r_{\text{н}}^4} + \frac{113}{l^2} \right),$$

где l — расстояние между кольцами жесткости, мм .

В расчетах на устойчивость принимают запас прочности, равный 2,5, т.е. действующие напряжения должны быть менее критических в 2,5 раза.

Размеры кольца жесткости следует выбирать так, чтобы кольцо было достаточно прочным. Если кольца изготовляют из того же материала, что и сосуд, или из более прочного, то должно быть выдержано условие

$$\sigma'_{\text{кр}} \geq 0,0605Es^2 \left[4,5 \frac{l^2}{r_{\text{н}}^4} + \frac{7}{6} \frac{\pi}{(2l)^2} \right] + 4,36 \frac{lEJ_{\text{к}}}{sR_{\text{к}}^3 r_{\text{н}}}, \quad (3-28)$$

где $R_{\text{к}}$ — радиус кольца жесткости по его центру тяжести, мм ;

$J_{\text{к}}$ — момент инерции поперечного сечения кольца, мм^4 .

Величину радиуса кольца по его центру тяжести и момент инерции подбирают удовлетворяющими условию (3-28).

3-8. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ

Продольные и поперечные сварные швы обечайек стальных сосудов должны быть только стыковыми. Типы сварных соединений показаны на рис. 3-15. Допускается присоединение втавр для приварки плоских днищ, фланцев, трубных решеток и других аналогичных элементов, а также двусторонняя приварка внахлестку днищ к цилиндрической обечайке при тол-

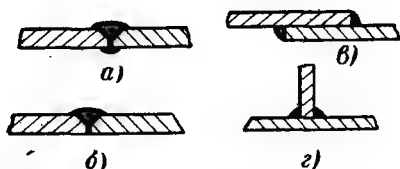


Рис. 3-15. Типы сварных соединений.

а — в стык, с V-образной разделкой, подваренный со стороны вершины шва; б — стыковой шов, сваренный только с одной стороны; в — соединение внахлестку; г — тавровое соединение.

щине стенки отбортованной части днища не более 16 мм.

Расчет толщины стенки сварных сосудов при давлении менее 25 ати производят по формуле,

$$s = \frac{pD_B}{200\sigma_{\text{доп}\varphi_{\text{св}}}} + C,$$

а при давлении более 25 ати по формуле

$$s = \frac{pD_B}{230\sigma_{\text{доп}\varphi_{\text{св}}} - p} + C.$$

Таблица 3-7

Наибольшие допускаемые значения коэффициента прочности сварного шва

Тип соединения и метод сварки	Не более
Стыковые швы с двусторонним проваром, выполняемые автоматической сваркой под слоем флюса (кроме швов на заготовках для штампуемых днищ)	1
Соединения втавр, выполняемые автоматической сваркой под слоем флюса с обеспечением двустороннего сплошного провара	1
Соединения втавр, выполняемые ручной электродуговой сваркой при обеспечении сплошного провара . .	0,95
Стыковые швы, выполняемые вручную и подвариваемые со стороны вершины шва	0,95
Стыковые швы, выполняемые автоматической сваркой под слоем флюса на заготовках для штампуемых днищ	0,95
Стыковые швы, выполняемые вручную с подкладкой со стороны вершины шва	0,90
Соединения втавр, не обеспечивающие сплошного провара соединяемых элементов	0,8
Соединения внахлестку при наличии швов с двух сторон	0,8
Стыковые швы, свариваемые автоматической сваркой под слоем флюса только с одной стороны	0,8
Стыковые швы, свариваемые электро-сваркой вручную и доступные только с одной стороны	0,7



Рис. 3-16. Переходной шов от толстой обечайки к тонкой.

При расчете на прочность сварных соединений сосудов, работающих под давлением, коэффициенты прочности шва $\varphi_{\text{св}}$ принимают не больше указанных в табл. 3-7.

Если шов выполняется в основном автоматической сваркой под флюсом и площадь поперечного сечения слоя металла, наплавленного ручную сваркой, не превышает 15% площади сечения сварного шва, шов считают сваренным автоматической сваркой. Коэффициент прочности сварного шва выбирают в этом случае как для автоматической сварки.

При проектировании стыковых сварных соединений между элементами разной толщины предусматривают плавные переходы от одного элемента к другому путем постепенного утонения более толстого элемента на длине, равной не менее пятикратной разности толщин стыкуемых элементов (рис. 3-16).

Если разница по толщине соединяемых элементов составляет не более 30% от толщины тонкого элемента и не превышает 5 мм, то допускается применение сварки без предварительного утонения более толстого элемента.

3-9. СОСУДЫ, ПОДВЕРЖЕННЫЕ НАРУЖНОМУ ДАВЛЕНИЮ

Когда цилиндрический сосуд работает при избыточном наружном давлении, возникает опасность смятия цилиндрической оболочки, т. е. потери устойчивости из-за искажения формы.

Всякая цилиндрическая оболочка, даже изготовленная на самом совершенном оборудовании, имеет отклонения от правильной цилиндрической формы. Если внутреннее избыточное давление способствует приближению формы оболочки к идеальной цилиндрической, то наружное действует противоположно.

В отношении устойчивости против избыточного наружного давления сосуды делятся на «длинные» и «короткие». В длинных, длина которых больше 12 диаметров, днища практически не влияют на устойчивость. Для них

$$p_{\text{кр}} = \frac{E}{4(1-\mu^2)} \left(\frac{s}{R_B} \right)^3,$$

где $p_{\text{кр}}$ — критическое давление, вызывающее потерю устойчивости, ати;

Значения модуля упругости первого ряда в зависимости от температуры для сталей различных марок, кг/мм²

Температура, °C	Марки стали							
	05*	20*	25*	30*	16М*	12МХ*	15ХМ*	1Х18Н9Т**
20	20 500	20 200	20 200	20 400	—	21 050	20 850	20 200
100	19 600	18 700	20 000	20 000	—	—	—	19 800
200	18 800	17 900	19 500	19 500	—	—	—	19 300
300	17 500	17 000	18 900	18 900	—	—	19 900	18 500
400	16 100	16 100	16 700	16 700	18 900	—	19 000	17 700
450	15 700	13 700	15 200	15 200	—	17 370	17 160	—
500	—	—	—	—	16 800	—	—	16 900
600	—	—	—	—	—	—	15 600	16 000
700	—	—	—	—	—	—	—	15 000

* После нормализации.

** После закалки и старения.

E — модуль упругости первого рода, кг/см²;

μ — коэффициент Пуассона;

s — толщина стенки сосуда, мм;

R_b — внутренний радиус сосуда, мм.

Отсюда можно определить толщину стенки сосуда с учетом коэффициента запаса устойчивости m

$$s = 1,538 R_b \sqrt[3]{\frac{mp}{E}}.$$

Здесь μ принят равным 0,3 (для большинства металлов). Коэффициент запаса устойчивости выбирают обычно порядка 5. Меньшие значения допускаются для точно изготовленных конструкций, работающих в вертикальном положении. Первоначальная овальность горизонтального цилиндрического сосуда обычно возрастает под действием собственного веса и веса загруженной массы. В этих случаях коэффициент запаса устойчивости следует несколько увеличивать, принимая его от 5 до 7—8.

Расчет относительно толстостенных сосудов, т. е. при $s \geq 0,046 R_b$, следует производить по формуле

$$p_{кр} = \frac{s}{R_b} \frac{\sigma_T}{1 + \frac{4\sigma_T}{E} \left(\frac{R_b}{s}\right)^2},$$

Рабочее давление должно быть менее критического примерно в 5 раз.

Величину модуля упругости различных материалов в зависимости от температуры выбирают по табл. 3-8.

Если аппарат закрыт по концам днищами и подвержен внешнему давлению, то в поперечных сечениях его возникают напряжения сжатия, несколько снижающие величину критического давления.

Для коротких цилиндров, находящихся под всесторонним давлением и выполненных из материалов с $\mu = 0,3$, критическое давление можно определять по формуле

$$p_{кр} = \frac{2,6E \left(\frac{s}{2R_b}\right)^{2,5}}{\frac{L}{2R_b} - 0,45 \left(\frac{s}{2R_b}\right)^{0,5}}.$$

В этой формуле обозначения и размерности те же, что и выше; длина сосуда L указывается в миллиметрах.

Если сомнения вызывают не устойчивость короткого сосуда, а его прочность, то допускаемое давление определяют по формуле

$$p_{доп} = \frac{200\sigma_{доп} (s - C)}{D_n},$$

а необходимую толщину стенки по формуле

$$s = \frac{p D_n}{200\sigma_{доп}} + C;$$

здесь p — наружное избыточное давление, атм;

D_n — наружный диаметр, мм;

φ — коэффициент ослабления сварным швом, отверстиями и т. п.

Для увеличения устойчивости цилиндрической оболочки, подверженной наружному давлению, часто устанавливают кольца жесткости.

3-10. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ВЫПУКЛЫХ ДНИЩ

В теплообменных аппаратах применяют сферические и эллиптические днища. Сферическое полушаровое днище (рис. 3-17) изготавливают путем сварки штампованного сегмента и секторов. Эллиптические днища (рис. 3-18) штампуют из листа с отбортовкой. Изготовление применявшихся ранее коробовых днищ (рис. 3-19) запрещено ГОСТ 6533-53 с 1 июля 1955 г.

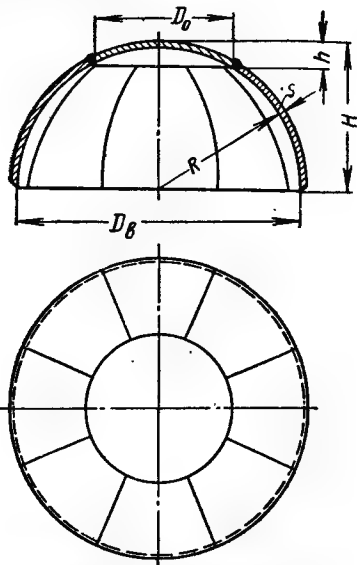


Рис. 3-17. Сферическое полушаровое днище.

Днища представляют собой тела вращения. Если внутреннее давление не велико, то расчетная толщина стенки мала по сравнению с остальными раз-

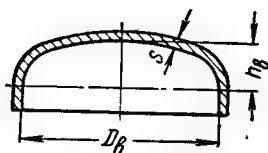


Рис. 3-18. Эллиптическое выпуклое днище.

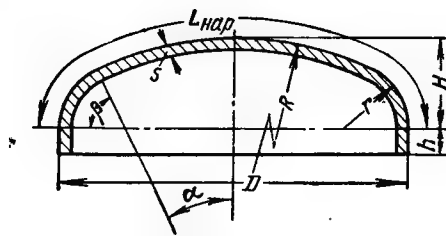


Рис. 3-19. Коробовое днище.

мерами сосуда и радиусами кривизны. Выведем прежде всего условие равновесия дифференциально малого элемента упругой тонкостенной оболочки.

Обозначим через r_1 и r_2 главные радиусы кривизны оболочки (рис. 3-20), т. е. радиусы кривизны, расположенные в меридиональной плоскости и в плоскости, перпендикулярной к ней. Выделим из стенки сосуда двумя меридиональными сечениями и двумя перпендикулярными к ним плоскостями дифференциально малый элемент и рассмотрим условие его равновесия. Длина элемента в плоскости радиуса r_1 — dl_1 , а в плоскости радиуса r_2 — dl_2 .

Запишем условия равновесия элемента оболочки относительно нормали, проходящей через его центр.

Напряжения σ_1 , действующие по площадке $s \, dl_2$ (s — толщина стенки элемента), дадут проекцию на эту ось, равную:

$$\sigma_1 s \, dl_2 \frac{0,5 dl_1}{r_1}. \quad (3-29)$$

Так как напряжения σ_1 действуют по двум сторонам от нормали совершенно симметрично и по площадкам одинаковой площади, то суммарная их сила получится удвоенным значением, найденного по выражению (3-29).

Аналогично поступают относительно σ_2 . Сила от этих напряжений равна:

$$\sigma_2 s \, dl_1 \frac{0,5 dl_2}{r_2}.$$

В противоположном направлении действует сила от давления на площадку, равная:

$$p \, dl_1 dl_2.$$

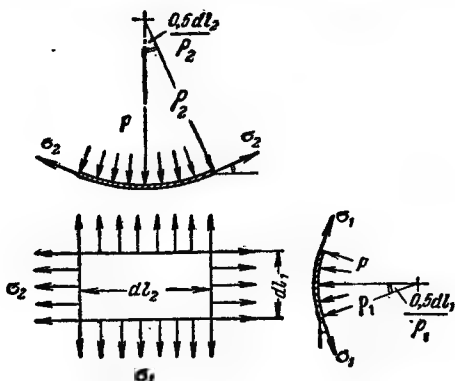


Рис. 3-20. Элемент оболочки в форме тела вращения.

При принятых на чертеже обозначениях сил получаем условие равновесия

$$\sigma_1 s dl_2 \frac{dl_1}{l_1 r_1} + \sigma_2 s dl_1 \frac{dl_2}{l_2 r_2} = p dl_1 dl_2,$$

отсюда

$$\frac{\sigma_1}{r_1} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{p}{s}. \quad (3-30)$$

Применим полученное уравнение для определения напряжений в стенке полушарового днища, нагруженного внутренним равномерным давлением. Из условия симметрии конструкции и симметрии нагружения

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma.$$

Воспользовавшись этим дополнительным условием, находим из уравнения (3-30) величину σ :

$$\sigma = \frac{pR_B}{2s_1} = \frac{pD_B}{4s_1}.$$

Здесь мы приняли радиус кривизны равным внутреннему радиусу сосуда. Такое допущение оправдано, так как толщина стенки днища весьма мала по сравнению с радиусом кривизны. Из уравнения (3-30) можно определить также тангенциальное напряжение в стенке цилиндрического сосуда, если принять во внимание, что в этом случае $r_2 = \infty$:

$$\sigma_t = \frac{pD_B}{2s_1}.$$

Сопоставляя максимальные растягивающие напряжения в цилиндре и полушаровом днище, видим, что максимальные напряжения в цилиндре при одном и том же давлении, внутреннем диаметре и толщине стенки в 2 раза больше, чем в полушаровом днище.

При конструктивном расчете сферических днищ пользуются формулой

$$s_1 \geq \frac{pD_B}{400\sigma_{\text{доп}} \varphi_{\text{св}}} + C \quad (3-31)$$

или для проверочного расчета

$$p \leq \frac{400\sigma_{\text{доп}} \varphi_{\text{св}} (s_1 - C)}{D_B}.$$

Коэффициент $\varphi_{\text{св}}$ учитывает ослабление днища из-за наличия стыковых сварных швов. Значения остальных величин те же, что и в предыдущих случаях. C — величина, добавляемая к рас-

четной толщине стенки, определяемая так же, как для цилиндрических корпусов сосудов.

При расчете днищ сферической формы при давлении более 25 *ати* пользуются формулой, полученной из условия прочности по энергетической теории:

$$s_1 \geq \frac{pD_B}{400\sigma_{\text{доп}} \varphi_{\text{св}}} - 2p + C. \quad (3-32)$$

При давлении до 25 *ати* формула (3-32) дает очень небольшое уточнение по сравнению с формулой (3-31), но несколько сложнее ее.

Сферические днища применяют обычно для небольших давлений, когда величина $2p$ в знаменателе не имеет существенного значения по сравнению с величиной $400\sigma_{\text{доп}} \varphi_{\text{св}}$.

По расчету полушаровое днище можно делать тоньше цилиндрического сосуда, однако из технологических соображений его толщину берут обычно равной толщине цилиндрической части.

Методика расчета эллиптических днищ отличается от методики расчета полушаровых днищ. Эллиптические днища имеют цилиндрическую часть, служащую для присоединения к цилиндрической части сосуда. При равных высотах h лучше всего сопротивляется внутреннему давлению эллиптическое днище, т. е. такое, кривые меридионального сечения которого представляют собой половину эллипса с большой осью, равной диаметру сосуда, и малой осью, равной $2h$.

Формула для определения толщины стенки эллиптического днища, помещенная в «Нормах расчета элементов паровых котлов на прочность», полученная по методу предельных нагрузок, имеет следующий вид:

$$s_1 = \frac{pD_B}{400\sigma_{\text{доп}} - p} \cdot \frac{D_B}{2h_B} + C$$

или для проверочного расчета

$$p \leq \frac{800(s_1 - C)\sigma_{\text{доп}}}{D_B + \frac{D_B}{2h_B}(s_1 - C)} \cdot \frac{h_B}{D_B}. \quad (3-33)$$

Высоту выпуклой части днища не разрешается принимать менее $0,2D_B$. При $h_B/D_B > 0,3$ толщина днища принимается равной толщине цилиндрической

части, так как прочность днища больше прочности цилиндра.

Так как напряжение в днище при $h_b/D_b > 0,3$ меньше, чем в цилиндрической части сосуда, то люки и лазовые отверстия стараются располагать в днищах. Толщину днища, имеющего лазовые отверстия или другие неукрепленные отверстия, рассчитывают по формуле

$$s_1 = \frac{pD_b}{400\sigma_{\text{доп}} - p} \frac{D_b}{2h_b} + C,$$

где коэффициент z определяется выражением

$$z = 1 - \frac{d}{D_b};$$

здесь d — максимальный размер лаза или неукрепленного отверстия. Отсюда при проверочном расчете можно определить допускаемое давление в сосуде

$$p = \frac{800(s_1 - C)z\sigma_{\text{доп}}}{D_b + 2\frac{h_b}{D_b}(s_1 - C)} \frac{h_b}{D_b}. \quad (3-34)$$

Днища с укрепленными отверстиями рассчитывают как глухие. Отштампованные борта лазового отверстия укреплениями не считаются. Расстояние от края днища до края отверстия по проекции днища на плоскость не должно быть менее $0,1 D_b + s_1$. При наличии в днище двух или более отверстий расстояние между ними должно быть не менее диаметра наименьшего отверстия (рис. 3-21). Размеры лазовых отверстий принимают обычно 300×400 или 320×425 мм.

Добавляемая к расчетной толщине стенки величина C принимается равной:

- 3 мм — при расчетной толщине стенки ($s_1 - C$) до 10 мм включительно;
- 2 мм — при расчетной толщине стенки от 10 до 20 мм;
- 1 мм — при расчетной толщине стенки от 20 до 30 мм;
- 0 — при расчетной толщине стенки более 30,5 мм.

При выборе окончательной толщины стенки днища разрешается округлять размер в меньшую сторону в пределах до 0,5 мм. Если сосуд работает в контакте с коррозионно-активной средой, C увеличивают на 2—6 мм.

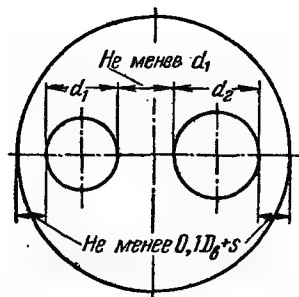


Рис. 3-21. Выпуклое днище с двумя отверстиями.

При выборе допускаемых напряжений поправочный коэффициент η к допускаемому напряжению принимают для глухих днищ равным 1,0, а для днищ с неукрепленными отверстиями 0,95.

Для проверки прочности днища при гидравлическом испытании пользуются формулами (3-33) или (3-34) в зависимости от типа днища: глухого или ослабленного отверстиями. Допускаемое давление при проверочном расчете определяют обычно по формуле

$$\sigma_{\text{доп}} = 0,45\sigma_b^{20},$$

где σ_b^{20} — временное сопротивление материала днища при комнатной температуре, кг/мм^2 .

Толщина днища, штампованного из сварной заготовки, должна быть не менее определенной по формуле

$$s_1 = \frac{pD_b}{400\sigma_{\text{доп}}\varphi_{\text{св}} - p} \frac{D_b}{2h_b} + C.$$

Штампованные днища для сосудов и аппаратов химической промышленности изготавливаются согласно нормам НМХ 85-56 [Л. 62].

Литые стальные выпуклые днища рассчитывают по такой же методике, но допускаемые напряжения принимают в 1,4 раза меньше, чем для штампованных, а величину C принимают равной минусовому технологическому допуску плюс 2 мм.

При расчете аппаратуры для химической и пищевой промышленности наряду с описанной выше методикой толщину стенки глухих эллиптических днищ определяют по формуле

$$s_1 = \frac{pD_{\text{св}}}{200\sigma_{\text{доп}}\varphi_{\text{св}}} + C,$$

где s_1 — толщина днища, мм;
 p — внутреннее давление, *ати*;
 D_c — средний диаметр цилиндрической части днища без поправки на коррозию, мм;
 y — коэффициент, выбираемый по рис. 3-22;
 $\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение, кг/мм^2 ;
 $\varphi_{\text{св}}$ — коэффициент прочности сварного шва;
 C — величина, добавляемая на коррозию и минусовый технологический допуск, мм.

Величина коэффициента y установлена экспериментальным путем. Допускаемое напряжение в сосудах пятой категории, для расчета которых чаще всего пользуются этой методикой, определяют как

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_b^t}{3,5}.$$

В этом случае максимальное допускаемое давление равно:

$$p = \frac{200\sigma_{\text{доп}}\varphi_{\text{св}}(s_1 - C)}{D_y}.$$

Кроме сферических полушаровых и эллиптических днищ для сосудов, работающих при давлении до 0,7 *ати* и не подведомственных Госгортехнадзору, применяют сферические неотбортованные днища с укрепляющим кольцом и без него (рис. 3-23). Иногда эти днища применяют для давлений выше 0,7 *ати* с разрешения в каждом отдельном случае инспекции Госгортехнадзора. Преимущества таких днищ — простота изготовления и дешевизна.

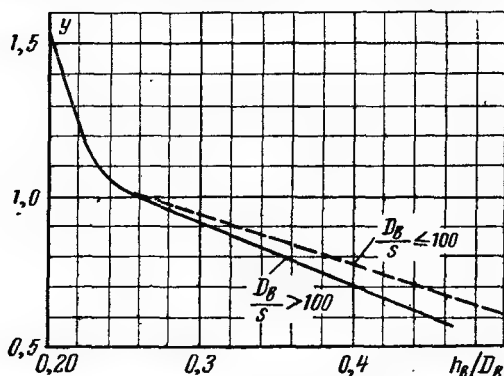


Рис. 3-22. Диаграмма для выбора величины коэффициента y в зависимости от отношения h_b/D_b .

При их изготовлении не требуются мощные прессы.

Для расчета сферических неотбортованных днищ можно пользоваться диаграммами, представленными на рис. 3-24 и 3-25, а и б. Методика расчета ясна из примера.

Пример. Определить толщину днища для сосуда диаметром 2000 мм, работающего под внутренним давлением 1,8 *ати* при комнатной температуре. Сосуд должен быть изготовлен из котельной стали 15К, для которой допускаемое напряжение составляет 13,3 кг/мм^2 .

По диаграмме рис. 3-24 находим, что для данных условий рациональнее всего применить неотбортованное днище с укрепляющим кольцом. Далее, по рис. 3-25, б определяем величину максимальных напряжений при толщине стенки сосуда и днища 10 мм и при укрепляющем кольце сечением 60×20 мм при внутреннем давлении 1 *ати*. Получаем $\sigma_{\text{макс}} = 7,0 \text{ кг/мм}^2$. При внутреннем давлении 1,8 *ати* $\sigma_{\text{макс}} = 7,0 \times 1,8 = 12,6 \text{ кг/мм}^2$. Максимальное напряжение несколько меньше допускаемого (13,3 кг/мм^2), следовательно можно остановиться на этих размерах.

Выпуклые днища применяют как в сосудах, подверженных внутреннему давлению, так и в сосудах, подверженных избыточному наружному давлению, например в вакуумных колоннах и теплообменных аппаратах с паровыми рубашками (рис. 3-26). При наружном давлении опасна потеря днищем устойчивой формы, т. е. образование вмятин. Поэтому при изготовлении выпуклых днищ, предназначенных для работы с избыточным на-

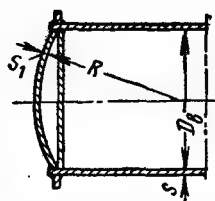


Рис. 3-23. Сферическое неотбортованное днище с укрепляющим кольцом.

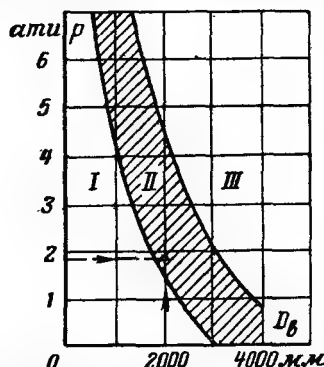


Рис. 3-24. Диаграмма для выбора типа сферических неотбортованных днищ в зависимости от внутреннего диаметра сосуда и давления. Область I — неотбортованные днища без укрепляющего кольца; область II — неотбортованные днища с укрепляющим кольцом; область III — отбортованные днища.

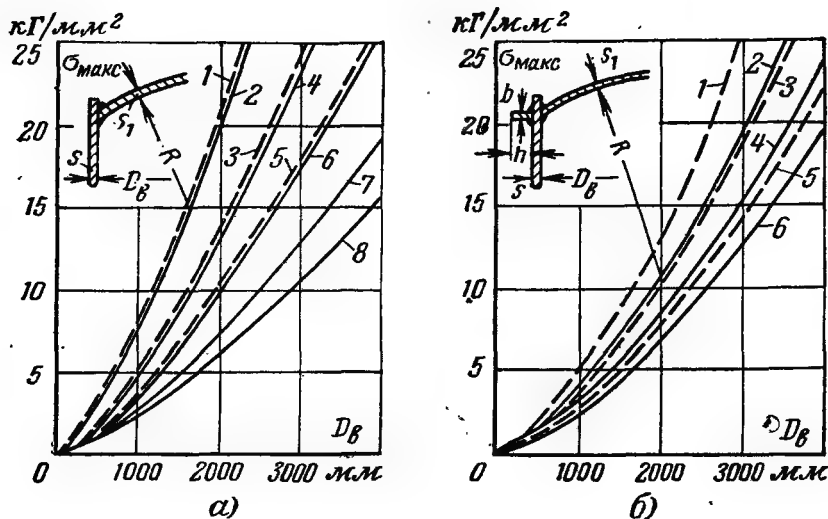


Рис. 3-25.

а — диаграмма для определения напряжений в сферическом неотбортованном днище без укрепляющего кольца при внутреннем избыточном давлении 1 атм. Радиус кривизны днища равен диаметру сосуда $R = D_B$. 1 — толщина цилиндрической части сосуда $s = 6$ мм, днища — $s_1 = 8$ мм; 2 — то же $s = 8$ мм; $s_1 = 6$ мм; 3 — то же $s = 8$ мм; $s_1 = 10$ мм; 4 — то же $s = 10$ мм; $s_1 = 8$ мм; 5 — то же $s = 10$ мм; $s_1 = 12$ мм; 6 — $s = 12$ мм; $s_1 = 10$ мм; 7 — $s = 12$ мм; $s_1 = 12$ мм; 8 — $s = 14$ мм; $s_1 = 14$ мм;

б — график для определения напряжений в сферическом неотбортованном днище с укрепляющим кольцом при внутреннем избыточном давлении 1 атм. Радиус кривизны днища равен диаметру сосуда $R = D_B$. Для кривых 1, 3, 5 сечения кольца $h \times b = 40 \times 14$; для кривых 2, 4, 6 — $h \times b = 67 \times 20$. Толщина стенки цилиндрической части сосуда во всех случаях равна толщине днища: 1 — толщина днища и толщина стенки цилиндрической части сосуда равны 6 мм; 2 — то же 6 мм, но укрепляющее кольцо толще; 3 и 4 — то же $s_1 = s = 8$ мм; 5 и 6 — то же $s_1 = s = 10$ мм.

ружным давлением, необходимо с высокой точностью выдерживать заданную форму.

Для расчета днищ, работающих под наружным давлением, применяют те же формулы, что и при расчете днищ, работающих под внутренним

давлением, но снижают допускаемые напряжения. В котельной технике допускаемые напряжения снижают в 1,4 раза, а в химической и нефтяной промышленности — обычно в 1,7 раза. Ниже приведен пример расчета.

Пример. Определить толщину стенки сферического днища выпарного аппарата, изготовленного из котельной стали 15К. В рубашке находится греющий пар давлением 3 атм. Температура стенки днища 120°C . Допускаемое напряжение принимаем $12,1 \text{ кг/мм}^2$. Днище имеет сварные стыковые швы, выполненные ручной дуговой сваркой с двусторонним проваром — $\varphi_{\text{св}} = 0,95$. Внутренний диаметр сосуда равен 610 мм, отсюда

$$s_1 = 1,7 \frac{p D_B}{400 \sigma_{\text{доп}} \varphi_{\text{св}}} + C = \frac{1,7 \times 3,0 \times 610}{400 \times 12,1 \times 0,95} + 2 = 2,7 \text{ мм.}$$

Из конструктивных и технологических соображений выбираем $s_1 = 7 \text{ мм}$, так как днище сосуда имеет сварные швы.

3-11. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ КОНИЧЕСКИХ ДНИЩ И ПЕРЕХОДОВ

По условиям технологического процесса часто необходимо полное удаление продуктов из аппарата. В таких случаях применяют конические днища.

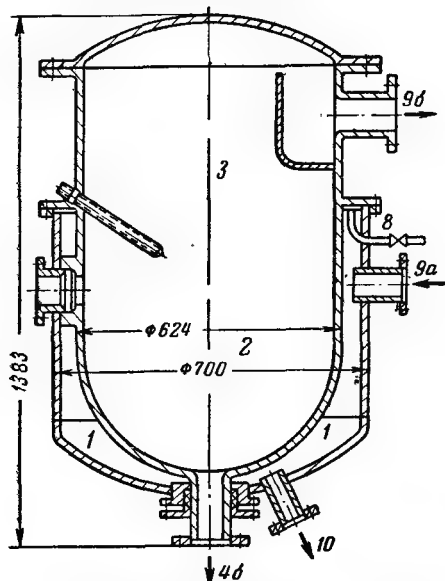


Рис. 3-26. Выпарной аппарат с паровой рубашкой.

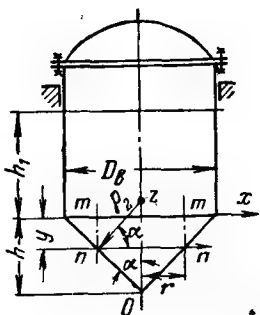


Рис. 3-27. Схема расчета сосуда с коническим дном.

Конические переходы применяют для соединения цилиндрических сосудов разных диаметров.

Напряженное состояние в коническом днище может быть различным в зависимости от того, нагружено ли оно давлением пара или газа либо гидравлическим давлением воды или другой жидкости. В некоторых аппаратах действует газовое и гидростатическое давление.

Рассмотрим напряжения, возникающие под действием давления газа. Расчетная схема приведена на рис. 3-27.

Для любого тела вращения, в том числе и для конуса, справедливо уравнение

$$\frac{\sigma_1}{r_1} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{p}{s_1}.$$

В данном случае $r_1 = \infty$. Следовательно, как и в стенке цилиндрического сосуда радиуса r_2 ,

$$\sigma_2 = \frac{pr_2}{s_1}. \quad (3-35)$$

Величину меридиональных напряжений σ_1 можно определить из условия равновесия. Эти напряжения должны уравновешивать силу от давления столба жидкости в любом сечении. Определим их для произвольного сечения $n-n$. Составляющая сила от меридиональных напряжений в направлении оси сосуда равна:

$$Q = 2\pi r s_1 \sigma_1 \cos \alpha.$$

С другой стороны, эта составляющая уравновешивает давление на условию отбрасываемую нижнюю часть сосуда

$$Q = \pi r^2 p,$$

откуда

$$\sigma_1 = \frac{pr}{2s_1 \cos \alpha} = \frac{pr_2}{2s_1}.$$

Следовательно, в любом сечении меридиональное напряжение в 2 раза меньше окружного. Оба напряжения достигают максимума в месте перехода от цилиндра к конусу, так как радиус r_2 здесь наибольший.

Наибольшее напряжение в этом месте

$$\sigma_{\max} = \frac{pD_B}{2s_1 \cos \alpha}.$$

Из условия $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}$ может быть определена необходимая толщина стенки

$$s_1 = \frac{pD_B}{200\sigma_{\text{доп}}\varphi_{\text{св}} \cos \alpha} + C.$$

Здесь принят коэффициент 200 вместо 2, так как внутреннее давление измеряют обычно в кг/см^2 , а напряжение в кг/мм^2 ; $\varphi_{\text{св}}$ — коэффициент прочности сварного шва, так как в месте перехода от цилиндрической части сосуда к конической может располагаться сварной шов. Остальные обозначения те же, что и ранее.

Допускаемое давление равно:

$$p = \frac{200\sigma_{\text{доп}}\varphi_{\text{св}} \cos \alpha (s_1 - C)}{D_B}.$$

Далее, рассмотрим напряженное состояние в коническом днище, подверженном гидростатическому давлению. Высота столба жидкости в сосуде (рис. 3-27) доходит до h_1 над уровнем края конуса.

Давление столба жидкости в любой точке конуса равно:

$$p = \gamma (h_1 + y),$$

где y — расстояние по вертикали от рассматриваемой точки конуса до места сопряжения конуса с цилиндром; γ — удельный вес жидкости.

Можно воспользоваться уравнением (3-35) для окружного напряжения, которое и в этом случае больше меридионального. Подставив в него величины переменного значения давления и радиуса кривизны

$$r_2 = \frac{(h - y) \operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha},$$

получим:

$$\sigma_2 = \frac{\gamma (h_1 + y) (h - y) \operatorname{tg} \alpha}{s_1 \cos \alpha}. \quad (3-36)$$

Для определения максимальной величины окружного напряжения исследуем выражение (3-36) на максимум и минимум. Приравняем производную нулю

$$\frac{d}{dy} \left[\frac{\gamma (h_1 + y) (h - y) \operatorname{tg} \alpha}{s_1 \cos \alpha} \right] = 0.$$

Из этого уравнения максимум окружного напряжения получается при

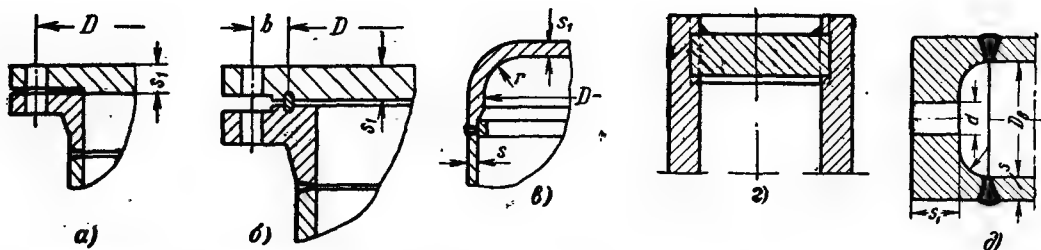
$$y = \frac{h - h_1}{2}. \quad (3-37)$$

Теперь можно определить максимальное окружное напряжение

$$\sigma_{\max} = \frac{\gamma \operatorname{tg} \alpha}{4s_1 \cos \alpha} (h + h_1)^2. \quad (3-38)$$

Принимая во внимание, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D_B}{2h}$$



и что коническое днище может быть со сварным швом, решим уравнение (3-38) относительно толщины стенки с учетом принятых размерностей и прибавим величину, добавляемую на коррозию, эрозию и минусовый технологический допуск

$$s_1 = \frac{\gamma D_B}{800 \sigma_{\text{доп}} \varphi_{\text{св}} \cos \alpha} \frac{(h + h_1)^2}{h} + C, \quad (3-39)$$

где s_1 — толщина днища, см; γ — удельный вес жидкости, кг/см³; D_B — внутренний диаметр, см; h и h_1 — высоты, см; $\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение, кг/мм².

Здесь знаменатель умножен на 100, так как размерность допускаемого напряжения — кг/мм². Весь вывод справедлив, пока величина y в формуле (3-37) не станет отрицательной. Отрицательная величина y показывает, что максимальное напряжение получается условно за пределами аппарата. Когда $h_1 \geq h$, максимальное значение напряжения получается при $y = 0$, то-есть в месте стыка конического днища с цилиндрическим корпусом

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{\gamma \operatorname{tg} \alpha}{s_1 \cos \alpha} h_1 h.$$

Отрицательная величина y показывает, что максимальное напряжение получается условно за пределами аппарата.

При условии $h_1 \geq h$ толщину стенки сосуда определяют по формуле

$$s_1 = \frac{\gamma h_1 D_B}{200 \varphi_{\text{св}} \sigma_{\text{доп}} \cos \alpha} + C. \quad (3-40)$$

Если над жидкостью находятся пары или газ, создающий избыточное давление $P_{\text{изб}}$, то их влияние можно учесть, заменяя давление пара или газа давлением эквивалентного столба жидкости

$$h_s = \frac{P_{\text{изб}}}{\gamma}.$$

При такой замене в формулы (3-39) и (3-40) вместо h_1 следует вводить $h_1 + h_s$.

Конические днища для сосудов и аппаратов химической промышленности изготовляют по нормам НМХ 85-56¹.

3-12. РАСЧЕТ ПЛОСКИХ ДОНЫШЕК, ЗАГЛУШЕК И КРЫШЕК

Конструкция плоских сплошных донышек различна. Наибольшее распространение получили плоские при-

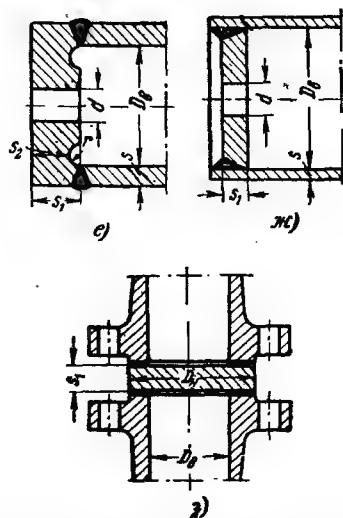


Рис. 3-28. Плоские донышки и крышки.

а — плоская крышка, крепящаяся к сосуду при помощи фланца; б — то же; в — плоское штампованное донышко; г — крышка на резьбе с обваркой для уплотнения; д, е и ж — плоские приварные донышки; з — донышко в виде заглушки, зажатой между двумя фланцами.

варные донышки жесткой конструкции (рис. 3-28, д) и приварные донышки с выточкой, играющей роль пластического шарнира (рис. 3-28, е). Донышкам с выточками следует отдавать предпочтение. Наряду с приварными донышками иногда применяют сварные (рис. 3-28, ж).

Для того чтобы при гидравлической пробе или ремонтных работах отключить часть трубопровода, применяют плоские заглушки, вставляемые во фланцевое соединение (рис. 3-28, з).

В теплообменных аппаратах находят применение плоские крышки. Наиболее распространенные конструкции сопряжения этих крышек с корпусом показаны на рис. 3-28. Иногда в донышках делают отверстия различного назначения. Донышки без отверстий называются глухими.

При проектировании теплообменников для пищевой и некоторых отраслей химической промышленности поль-

¹ «Химическое машиностроение», 1961, № 4.

зуются упрощенной методикой расчета этих элементов. Толщину глухих донышек, заглушек или крышек определяют по формуле

$$s_1 = D_b \sqrt{\frac{Kp}{100\sigma_{\text{доп}}}} + C, \quad (3-41)$$

где s_1 — толщина стенки крышки, мм;
 D_b — внутренний диаметр сосуда, мм;

K — коэффициент, зависящий от конструкции крышки и метода закрепления;

$\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение в крышке, донышке или заглушке, кг/мм²;

p — внутреннее избыточное давление, кг/см².

Коэффициент K принимают:

для плоских донышек, крепящихся к сосуду на резьбе	0,75
для плоских сварных и приварных донышек	0,50
для плоских штампованных приварных донышек с отбортовкой с радиусом кривизны между стеной и плоскостью не менее трех толщин донышка)	0,25
для заглушек, жестко зажатых между двумя фланцами	0,19
для плоских крышек (по рис. 3-28, а)	0,16
для плоских крышек (по рис. 3-28, б)	

$$K = 0,3 + \frac{1,4Q_6b}{Q_1D}.$$

В двух последних случаях величину диаметра D , подставляемую в формулу (3-41), принимают в соответствии с рис. 3-28; при подсчете K : Q_1 — усилие от внутреннего давления на площадь, ограниченную диаметром D ; Q_6 — усилие от затяжки болтов, равное от 1,4 до 2,0 Q_1 .

Плоские донышки, крепящиеся к сосуду на резьбе, допускают в сосудах с внутренним диаметром менее 300 мм (рис. 3-28,з).

По «Нормам расчета элементов паровых котлов на прочность» плоские донышки без центрального отверстия или с отверстием размером до $0,6D_b$ рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$s_1 = \frac{0,93s}{1-0,43 \frac{d}{D_b}} \sqrt{\frac{0,19p}{100\sigma_{\text{доп}}} \cdot \frac{D_b^2}{s^2} - 1}; \quad (3-42)$$

здесь d — диаметр отверстия в донышке, мм.

Формулу эту следует применять, если выполнены условия:

$$\frac{p}{100\sigma_{\text{доп}}} \geq 11,2 \frac{s^2}{D_b^2}; \quad (3-43)$$

$$\frac{p}{100\sigma_{\text{доп}}} \leq 2,9 \frac{s}{s + D_b}; \quad (3-44)$$

здесь s — толщина цилиндрической части сосуда.

В тех случаях, когда условие (3-44) не выполнено, толщину стенки сосуда нужно увеличить настолько, чтобы оно было выполнено. Далее, следует выполнить расчеты по рекомендуемой методике.

Формула (3-42), предложенная Центральным котлотурбинным институтом имени Ползунова, хорошо согласуется с экспериментами, в которых были взяты, однако, слишком короткие образцы — длина их цилиндрической части составляла всего $\frac{2}{3}$ наружного диаметра. Из-за того что близко расположенные донышки препятствовали развитию пластической деформации, пластический шарнир в месте соединения донышка с шарниром возник при более высоком давлении.

Подкорненное выражение в формуле (3-42) может обращаться в нуль или принимать отрицательное значение при определенных соотношениях размеров цилиндрической части сосуда, внутреннего давления и допускаемого напряжения. Когда подкорненное выражение обращается в нуль, толщина стенки донышка также становится равной нулю, что неправильно.

Если условие (3-43) не выполняется, то толщину стенки в «Нормах» рекомендуют определять по формуле

$$s_1 = \frac{s}{1 - 0,43 \frac{d}{D_b}} D.$$

Толщину сварных донышек, применяемых на давление не более 35 атм. определяют по тем же формулам, что и приварных, но с учетом ослабления сварным швом:

$$s_1 = \frac{s_1'}{\varphi_{\text{св}}};$$

здесь s_1' — расчетная толщина донышка без учета ослабления сварным швом.

Величину коэффициента прочности сварного шва $\varphi_{\text{св}}$ при автоматической

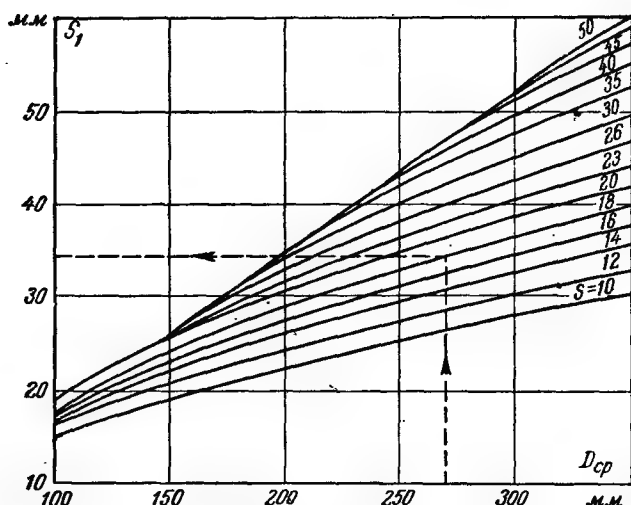


Рис. 3-29. Номограмма для определения толщины плоского доньшка.

сварке под флюсом принимают равной 0,8, а при ручной электродуговой 0,7. Допускаемые напряжения при определении толщины стенки доньшка по «Нормам расчета элементов паровых котлов на прочность» снижают на 20%. Для этого случая коэффициент η , учитывающий точность результатов расчета по принятой методике, равен 0,8.

Доньшки и корпус рекомендуется изготовлять из стали одной марки. Если же корпус выполняют из одной стали, а доньшки из другой, то в расчет вводят напряжение, допускаемое для менее прочной стали.

На основе решения задачи теории пластичности для круглой пластинки, нагруженной равномерным давлением и моментом по контуру, из условия одновременности достижения предельного состояния пластинкой и оболочкой Е. А. Троянским (МЭИ) получено уравнение (доньшко и цилиндрическая часть сосуда изготовлены из одного и того же материала)

$$\frac{1,92}{\sqrt{s D_{cp}}} s_1^3 - s_1^2 + 0,2s = 0; \quad (3-45)$$

здесь D_{cp} — средний диаметр цилиндрической части сосуда, мм.

Решение кубического уравнения занимает много времени, поэтому для практических расчетов оно сведено в номограмму (рис. 3-29).

Измерение предельных давлений для доньшек, приваренных к трубе (рис. 2-28, д и е), и доньшек, вваренных в трубу (рис. 2-28, ж), показало удовлетворительное согласование расчетных и опытных данных при расстоянии между доньшками $5D_n$ и более. Поэтому методике расчета, предложенной МЭИ, следует отдать предпочтение.

Толщина плоской заглушки (рис. 2-28, а) по «Нормам» выбирается по формуле

$$s = 0,4 D_n \sqrt{\frac{p}{100 \sigma_{доп}}},$$

а допускаемое рабочее давление при проверочном расчете

$$p = 625 \frac{s_1^2}{D_n^2} \sigma_{доп}.$$

Пробное гидравлическое давление на заглушку не должно превышать:

$$p_2 = 260 \frac{s_1^2}{D_n^2} \sigma_B.$$

Поправочный коэффициент η при расчете заглушек принимается равным единице.

3-13. РАСЧЕТ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Наиболее распространенные типы фланцев показаны на рис. 3-30.

Для расчета фланцевых соединений нет единой методики. При выборе размеров фланцев для сосудов, работающих под давлением, рекомендуется в основном пользоваться государственными стандартами и ведомственными нормами. Если в них нет указаний на методику выбора размеров фланцев для данного конкретного случая, то можно пользоваться изложенной ниже методикой.

Расчет фланцевых соединений состоит из расчета фланцев и шпилек. Болты во фланцевых соединениях обычно не применяют, так как при затяжке болта в стержне возникают большие скручивающие напряжения со стороны головки.

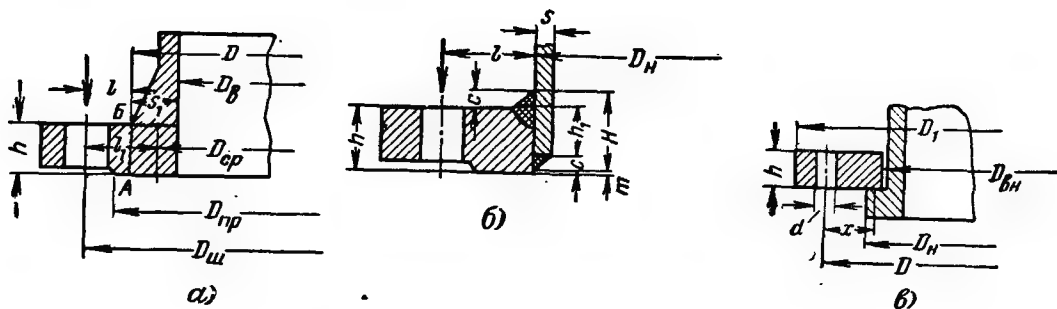


Рис. 3-30. Типы фланцев.
а — кованный; б — сварной; в — накидной.

При расчете шпилек определяют их диаметр и число.

Силу $Q_{\text{п}}$, передаваемую шпильками на прокладку, необходимую для герметичности фланцевого соединения до приложения внутреннего давления, можно определить по формуле

$$Q_{\text{п}} = \pi D_{\text{ср}} b' q_{\text{п}},$$

где $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр прокладки, см;

b' — условная ширина прокладки, учитывающая действительную поверхность соприкосновения ее с уплотнительными поверхностями фланца, см; обычно принимают $b' = 0,5b_0$.

$q_{\text{п}}$ — предварительное удельное давление на прокладку, определяемое по табл 3-9.

Нагрузка на шпильки в рабочих условиях должна компенсировать внутреннее давление и создавать удельное давление на прокладку, обеспечивающее герметичность в рабочих условиях.

Внутреннее давление действует по площади окружности, диаметр которой равен внутреннему диаметру прокладки плюс ее ширина. Таким образом, сила от внутреннего давления, передаваемая на шпильки, равна:

$$Q_1 = \frac{\pi (D_{\text{в}} + b_0)^2}{4} p.$$

Сила, необходимая для создания герметичности в рабочих условиях

$$Q_2 = \pi (D_{\text{в}} + b_0) b_0 m p,$$

где m — коэффициент удельного давления на прокладку, определяемый по табл. 3-9.

Далее, задавшись диаметром шпильки, определяют допускаемую нагрузку на одну шпильку

$$q_{\text{ш}} = \frac{\pi D_{\text{ш}}^2}{4} \sigma_{\text{доп}}$$

и число шпилек

$$n \geq \frac{Q_1 + Q_2}{q_{\text{ш}}}.$$

Допускаемое напряжение в шпильке выбирают по пределу текучести при рабочей температуре с коэффициентом запаса прочности $n_{\text{т}} = 1,3 \div 1,4$. Температуру шпильки принимают равной температуре рабочей среды в паропроводе.

В расчете необходимо проверить, достаточно ли найденное число шпи-

Таблица 3-9

Необходимое предварительное удельное давление и коэффициент m для различных прокладочных материалов

Материал прокладки	Необходимое предварительное удельное давление на прокладку, кг/см ²	Коэффициент, m
Твердый резиновый лист . .	50	0,75
Твердая резина, прошитая тканью	70	1,0
Паранит	150	2,0
Прессованный асбест . . .	315	2,5
Мягкий алюминий	700	4,0
Мягкая медь, морская латунь	1 000	4,75
Малоуглеродистая сталь . .	1 250	5,5
Стали IX13 и ЭИ496 . . .	1 500	6

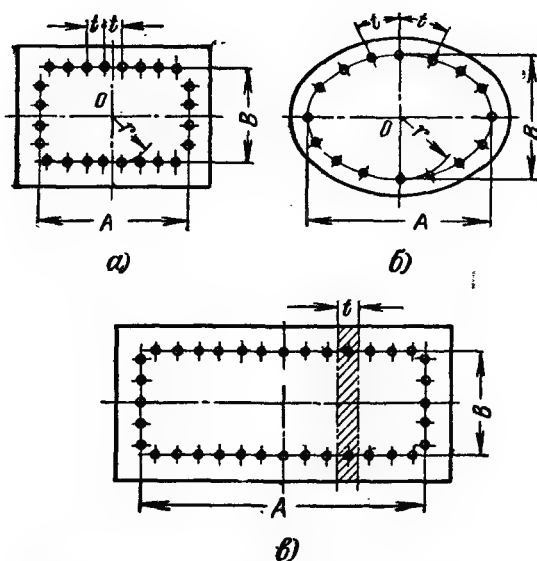


Рис. 3-31. Прямоугольный и эллиптический фланцы.

а — прямоугольный фланец, $A/B < 2$; б — эллиптический фланец; в — прямоугольный фланец, $A/B > 2$.

лек для обеспечения герметичности без внутреннего давления

$$n_1 \geq \frac{Q_{\pi}}{q_{\text{ш}}}.$$

Из найденных величин n и n_1 берут большую.

В нагретых фланцевых соединениях температура шпилек ниже температуры средней части фланца и прокладки, что приводит к дополнительной нагрузке на шпильки. Во время снижения температуры среды в сосуде шпильки могут оказаться горячее фланца и из-за теплового расширения затяжка ослабнет и фланец может начать пропускать жидкость или пар. Поэтому в сосудах с фланцевыми соединениями желательно избегать резких колебаний температуры.

На фланцах из перлитной стали не следует ставить шпильки из аустенитной стали, и наоборот, так как коэффициент линейного расширения аустенитной стали приблизительно в 1,5 раза больше, чем перлитной. Поэтому изменение температуры может вызвать расстройство фланцевого соединения.

При расчете шпилек фланцев прямоугольной и эллиптической формы (рис. 3-31) следует учитывать, что отдельные шпильки нагружены неодинаково. Обозначим шаг между болтами t ,

а наименьшее расстояние от центра тяжести нагруженной поверхности до ближайшей шпильки r . Тогда можно считать, что наиболее нагруженная шпилька воспримет нагрузку от внутреннего давления, равную для фланца прямоугольной формы

$$q_{\text{ш}}^{\text{макс}} = \frac{pABt}{2\pi r},$$

для фланца эллиптической формы

$$q_{\text{ш}}^{\text{макс}} = \frac{pABt}{8r}.$$

Формулы для определения $q_{\text{ш}}^{\text{макс}}$ — эмпирические.

Если $A/B \geq 2$, нагрузка на шпильку от внутреннего давления может быть вычислена как половина нагрузки на полоску шириной t и длиной B . С учетом возможной неравномерности

$$q_{\text{ш}}^{\text{макс}} = 0,6pBt.$$

Нагрузка от затяжки для придания герметичности считается распределенной равномерно между шпильками. Расчет диаметра шпилек производится по наиболее нагруженной шпильке.

Расчет фланца, составляющего одно целое с корпусом (рис. 3-30, а), выполняют как проверочный, принимая, что конструкция фланца и его размеры выбраны. Если в ходе расчета окажется, что какие-либо размеры недостаточны, их следует увеличить и расчет повторить.

Рассмотрим прочность фланца по сечению АБ.

Плечо изгиба

$$l = 0,5(D_{\text{ш}} - D),$$

где $D_{\text{ш}}$ — диаметр окружности, на которой расположены центры отверстий под шпильки;

D — диаметр, указанный на рис. 3-30а.

Изгибающий момент равен:

$$M'_{\text{изг}} = Ql,$$

где Q — наибольшая величина из $(Q_1 + Q_2)$ или Q_{π} , т. е. суммарная нагрузка на прокладку, обеспечивающая плотность в рабочих условиях или при от-

существовании давления внутри фланцевого соединения.

Момент сопротивления фланца по сечению AB

$$W' = \frac{\pi D h^2}{6} \text{ [см}^3\text{]}.$$

Напряжение от изгиба фланца

$$\sigma' = \frac{M'_{изг}}{100W'} \text{ [кг/мм}^2\text{]}.$$

Если условие прочности $\sigma' \leq \sigma_{доп}$ не удовлетворяется, следует увеличить размеры h или D и повторить расчет.

Проверим прочность фланца от изгиба по сечению BB . Изгибающий момент относительно середины этого сечения составит:

$$M_{изг} = 0,4 Q l_1 \text{ [кгсм]},$$

где 0,4 — коэффициент, учитывающий жесткость фланца;

$$l_1 = 0,5 (D_{ш} - D_{ср}) \text{ [см]}.$$

Момент сопротивления фланца по сечению BB

$$W'' = \frac{\pi D_{ср} s_1^2}{6}.$$

Максимальное напряжение в этом сечении

$$\sigma'' = \frac{M''_{изг}}{100W''} \text{ [кг/мм}^2\text{]}.$$

Если условие $\sigma'' \leq \sigma_{доп}$ не выполняется, следует увеличить размеры s_1 или $D_{ср}$ и повторить расчет.

Рассмотрим расчет приварного фланца (рис. 3-30,б). Изгибающий момент, передающийся на сварной шов,

$$M = Q l \text{ [кгсм]}.$$

Момент сопротивления сварного шва

$$W = \frac{\pi D_n (H^3 - h_1^3)}{6H} \text{ [см}^3\text{]}.$$

Напряжение от изгиба в сварном шве

$$\sigma_n = \frac{M}{100W}.$$

Касательное напряжение, срезающее сварной шов, можно определить как

$$\tau = \frac{Q_1}{200\pi D_n C}.$$

Приведенное напряжение по энергетической теории прочности

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_n^2 + 3\tau^2}.$$

Условие прочности в этом случае

$$\sigma_{пр} \leq \sigma_{доп}^{св},$$

где $\sigma_{доп}^{св}$ — допускаемое напряжение в сварном шве.

Если это условие не удовлетворяется, следует увеличить высоту сварного шва или толщину фланца.

Свободный или накидной фланец показан на рис. 3-30,в. Его толщину (в мм) можно определить по формуле

$$h = \sqrt{\frac{1,91 Q x}{(D_1 - D_{вн} - 2d) \sigma_{доп}}},$$

где Q — нагрузка на шпильки, кг;

x — расстояние от средней линии поверхности контакта фланца с отбортовкой до окружности центра болтов, мм;

D_1 — наружный диаметр фланца, мм;

$D_{вн}$ — внутренний диаметр фланца, мм;

d — диаметр отверстия под шпильки, мм;

$\sigma_{доп}$ — допускаемое напряжение, кг/мм².

Формула для определения толщины накидного фланца получена из условия прочности на изгиб по сечению, в которое попадают два отверстия под шпильки. Величина внутреннего и наружного диаметров фланца, диаметры отверстия под шпильки и расстояние x принимают по конструктивным соображениям. Следует стремиться к тому, чтобы величина x была минимальной, тогда толщина фланца получается небольшой.

3-14. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ТРУБ И КОРПУСОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ЖЕСТКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Аппараты жесткой конструкции дешевые и простые в изготовлении, имеют приварные трубные решетки, в которых при помощи сварки, развальцовки или пайки жестко закреплены трубы (рис. 3-32,а). В этих аппаратах возникают температурные напряжения

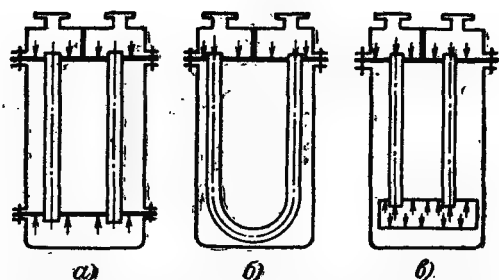


Рис. 3-32. Конструктивные схемы теплообменных аппаратов.

а — жесткая; б — с U-образными трубками; в — с плавающей головкой.

из-за разности температур корпуса и труб. В ряде случаев, когда тепловые удлинения особенно велики, на корпусе теплообменного аппарата жесткой конструкции устанавливают линзовые компенсаторы. Обычно это необходимо при разности температур теплоносителей в трубах и межтрубном пространстве более 50°C . Один из существенных недостатков теплообменных аппаратов этого типа — невозможность очистки наружной поверхности труб от осадков.

Наряду с теплообменными аппаратами жесткой конструкции применяют аппараты с U-образными трубами или с одной подвижной решеткой (рис. 3-32, б и в), разгруженные от тепловых напряжений.

Расчет теплообменного аппарата жесткой конструкции начинают с определения температурных напряжений в трубах аппарата и в его корпусе. Сумма линейных удлинений от температуры и напряжений в корпусе и трубах должны быть равны, так как они связаны жестко. Следовательно,

$$\alpha_t(t_t - t_0)l_t + \frac{l_t \sigma_t}{E_t} = \\ = \alpha_k(t_k - t_0)l_k + \frac{\sigma_k l_k}{E_k},$$

где α_t и α_k — коэффициенты линейного расширения труб и корпуса соответственно;

t_0 — температура, при которой были закреплены трубки в трубных досках;

t_t — температура труб;

t_k — температура корпуса;

l_t и l_k — длина труб и корпуса между трубными досками;

σ_t и σ_k — температурные напряжения в трубах и корпусе;
 E_t и E_k — модули упругости труб и корпуса при температурах t_t и t_k соответственно.

Уравнение, содержащее два неизвестных — σ_t и σ_k , написано в общем виде. Знаки перед вторыми слагаемыми определяются в ходе решения.

Второе условие — равенство усилий в трубах и корпусе

$$F_t \sigma_t + F_k \sigma_k = 0.$$

где F_t и F_k — площади поперечного сечения труб и корпуса соответственно. Решая эти уравнения с двумя неизвестными относительно температурных напряжений в трубах, получаем:

$$\sigma_t = \frac{\alpha_k(t_k - t_0) - \alpha_t(t_t - t_0)}{\frac{1}{E_t} + \frac{1}{E_k} \frac{F_t}{F_k}}.$$

Напряжение в корпусе

$$\sigma_k = -\sigma_t \frac{F_t}{F_k}.$$

Коэффициент линейного расширения латуни в пределах от 0 до 375°C составляет $\alpha_{\text{лат}} = 10^{-6} \cdot 17,487 + 0,00877 t \times 10^{-6} \text{ мм/мм} \cdot ^\circ\text{C}$, а углеродистой стали $\alpha_{\text{ст}} = 10^{-6} \cdot 11,188 + 0,00526 t \times 10^{-6} \text{ мм/мм} \cdot ^\circ\text{C}$. Модуль упругости латуни $E_{\text{лат}} = 8000 \text{ кг/мм}^2$.

При расчете тепловых напряжений следует принимать во внимание возможность работы на неустановившемся режиме, например, когда в трубах находится холодная вода, а в корпус поступает горячий пар.

Растягивающие тепловые напряжения следует суммировать с учетом знака с напряжениями от внутреннего давления или разрежения, действующими в том же или противоположном направлении, и проверить условие прочности для корпуса и труб

$$\sigma_{\text{сумм}} \leq \sigma_{\text{доп}}.$$

Если напряжения очень велики и условие прочности не удовлетворяется, устанавливают линзовые компенсаторы на корпусе или применяют конструкцию нежесткого типа.

Выше рассмотрены условия прочности под действием аксиальных напряжений. Необходимо проверить также прочность корпуса и трубы в тангенциальном направлении, в котором напряжение от перепада давления достигает максимума. В случае работы под внутренним избыточным давлением проверку выполняют по формулам (3-14) или (3-17), а при наружном избыточном давлении — по формулам, приведенным в § 9 этой главы.

При длинных трубах малого диаметра ставят поддерживающие перегородки толщиной 10—20 мм, выполняемые обычно из стали и располагаемые на расстоянии, равном 100—120 наружным диаметрам труб. Отверстия в промежуточных перегородках располагают так же, как в трубных досках, но несколько смещают их вверх или в сторону для обеспечения контакта между трубами и перегородкой. При трех или четырех перегородках крайние перегородки смещают относительно трубных досок приблизительно на 3 мм, а средние — на 5 мм. В местах перегородок, где нет труб, делают большие вырезы для облегчения перетекания теплоносителя. Иногда одну из перегородок ставят для половины труб, вторая их половина опирается на другую перегородку, несколько отстоящую от первой. В этом случае уменьшается сопротивление перетеканию теплоносителя.

Основное назначение перегородок — предотвратить вибрацию труб. Известны случаи, когда сильная вибрация труб приводила к их разрушению вследствие усталости.

3-15. РАСЧЕТ ТРУБНЫХ ДОСОК

Для определения толщины трубной доски необходимо знать способ закрепления, и схему ее нагружения. В теплообменных аппаратах с U-образными трубами или с плавающей головкой давление среды передается на полную поверхность трубной доски, включая площадь внутренних сечений выходящих или входящих труб. В теплообменниках с двумя неподвижными решетками (рис. 2-32, а) при расчете нагрузки на трубную доску следует исключить площади внутренних сечений труб. Кроме того, часть нагрузки

воспринимается трубами, обеспечивающими дополнительную жесткость системы. В этом случае требуется меньшая толщина трубной доски, однако система получается жесткой и в ней могут возникать термические напряжения.

В теплообменном аппарате не жесткой конструкции сила, действующая на всю трубную доску, может быть найдена по формуле

$$P = \frac{\pi D^2}{4} p \text{ [кг]}, \quad (3-46)$$

где D — диаметр доски, на который распространяется давление, см (до середины прокладки);
 p — перепад давлений по сторонам трубной доски, кг/см².

Толщина доски определяется по формуле для плоского днища, но с учетом ослабления отверстиями

$$s = D \sqrt{\frac{Kp}{100\sigma_{\text{доп}}\varphi}} + C, \quad (3-47)$$

где $K = 0,162$. Коэффициент ослабления доски отверстиями φ равен минимальному шагу между центрами отверстий за вычетом диаметра отверстия, отнесенному к шагу между отверстиями (рис. 3-33), т. е.

$$\varphi = \frac{b - d_n}{b}.$$

Толщина трубной доски должна быть не меньше величины, определяемой из условия надежной развальцовки труб. При развальцовке конца трубы в отверстие доски мостик между соседними отверстиями стремится выпучиться. Хорошее крепление трубы в доске получается только при достаточно толстых досках.

На основании опытных данных установлено, что из условия надежной развальцовки трубок толщина сталь-

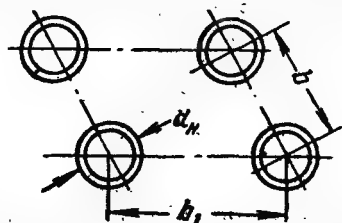


Рис. 3-33. Схема к определению коэффициента ослабления трубной доски.

ной трубной доски должна быть не меньше

$$s_{\min} = 5 + 0,125d \text{ [мм]},$$

где d — диаметр отверстия, мм.

Для медной трубной доски

$$s_{\min} = 10 + 0,2d \text{ [мм]}.$$

В то же время наименьшее сечение металла трубной доски в мостике между отверстиями должно быть не меньше 180 мм^2 при диаметре отверстия 38 мм и не меньше 450 мм^2 при диаметре отверстия 100 мм . Отсюда видно, что при увеличении диаметра отверстия в трубной доске приблизительно в 2,5 раза во столько же примерно раз возрастает необходимая площадь сечения мостика. Следовательно, минимальное необходимое сечение мостика

$$f_{\min} = \frac{180d_n}{38} = 4,8d_n.$$

При заданном шаге между трубами и заданном диаметре труб необходимую площадь поперечного сечения можно обеспечить путем выбора соответствующей толщины трубной доски:

Доска, более тонкая, чем это необходимо из условия надежной вальцовки труб, ненадежна: вальцовочные соединения получаются недостаточно прочными и плотными, они периодически расстраиваются, а при повторных развальцовках дают трещины.

Для теплообменных аппаратов нефтеперерабатывающих заводов толщину трубных досок принимают не меньше 24 мм .

В теплообменном аппарате жесткой конструкции на всю трубную доску действует сила от внутреннего давления, равная:

$$P_1 = \frac{\pi}{4} (D^2 - nd_{\text{вн}}^2) p \text{ [кг]}, \quad (3-48)$$

где D — диаметр доски, на который распространяется давление, см;

$d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр труб, см;

n — общее число труб в трубной доске;

p — перепад давлений по сторонам трубной доски, кг/см^2 .

Из сравнения формул (3-46) и (3-48) видно, что эта сила меньше, чем в

случае трубной решетки аппарата жесткой конструкции, в

$$\frac{D^2 - nd^2}{D^2}.$$

раз. При расчете аппаратов, для которых можно пренебречь укреплением трубных досок со стороны труб, в формулу (3-47) условно вводят поправочный коэффициент, учитывающий снижение нагрузки на трубную доску,

$$s = D \sqrt{\frac{Kp \frac{D^2 - nd_{\text{вн}}^2}{D^2}}{100\sigma_{\text{доп}}}} + C$$

или

$$s = \sqrt{\frac{Kp(D^2 - nd_{\text{вн}}^2)}{100\sigma_{\text{доп}}}} + C.$$

Укрепление трубных досок со стороны труб отсутствует, если они работают на сжатие и вследствие большой гибкости не могут воспринимать сжимающих усилий, а также если они закреплены с одной или с двух сторон в сальниках.

В тех случаях, когда трубы работают на растяжение при жестком закреплении их концов (развальцовка трубок с двух сторон, приварка или трипайка труб), толщина трубной доски определяется в зависимости от расположения труб и анкерных связей. В этих случаях силы от перепада давления на трубной доске в значительной степени воспринимаются трубами. Минимальную допустимую толщину стенки и минимальное сечение мостика определяют из условия надежности развальцовки по наружному диаметру труб и по шагу между ними. Из найденных величин принимают большую.

Далее проверяют достаточную надежность укрепления доски трубами, т. е. условия, при которых доска не будет оторвана от труб под действием перепада давления. Силу, приходящуюся на 1 пог. см поверхности контакта трубки с доской, можно найти по формуле

$$q = 0,025 \left(1,27a \frac{t}{d} - d \right) p \text{ [кг]},$$

где a — расстояние между рядами отверстий, мм (рис. 3-34);

t — шаг между центрами отверстий в ряду, мм;
 p — перепад давлений на трубной доске, кг/см²;
 d — диаметр отверстия, мм.

Величина q не должна превышать следующих значений: при развальцовке труб без отбортовки концов $q \leq 40$ кг/см; при развальцовке труб с отбортовкой обоих концов $q \leq 70$ кг/см. Здесь не учтены тепловые напряжения в трубах. При учете этих напряжений величина q может быть повышена до 120 кг/см.

Стенка трубной доски между трубами может сильно прогибаться. Поэтому необходимо проверить величину напряжений от изгиба в этом пространстве, которая должна быть меньше допускаемого напряжения

$$\sigma_{\text{доп}} \geq \frac{p}{360 \left(1 - 0,7 \frac{d}{e} \right) \left(\frac{s}{e} \right)^2}, \quad (3-49)$$

где $e = \frac{a+t}{2}$.

Если напряжение от изгиба превышает допускаемое, следует увеличить толщину стенки трубной доски, чтобы условие (3-49) выполнялось.

Применение нагревательных труб для укрепления трубных досок допустимо только при достаточной толщине труб. В каждом случае необходимо проверить трубы на прочность с учетом утонения из-за коррозии за весь срок эксплуатации.

Необходимо, чтобы

$$\sigma_{\text{доп}} \geq \frac{pd_{\text{вн}}}{4(s-C)} + \frac{P}{\pi(s-C)(d_{\text{вн}} + s - C)}, \quad (3-50)$$

где P — осевая растягивающая сила, кг.

Трубы для укрепления трубных решеток должны иметь толщину стенки не менее 2,5—3 мм.

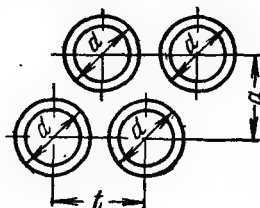


Рис. 3-34. Укрепление трубной доски в пределах трубного пучка.

3-16. РАСЧЕТ ТРУБНЫХ ДОСОК И ПЛОСКИХ СТенок, УКРЕПЛЕННЫХ АНКЕРНЫМИ СВЯЗЯМИ

Для укрепления плоских стенок применяют анкерные связи, используемые также для укрепления трубных досок, если их расчетная толщина, полученная из условия прочности на изгиб участка между трубами, слишком велика. В качестве анкерных связей используют трубы или болты.

Деформация анкерного болта пропорциональна его длине, поэтому в теплообменных аппаратах анкерные болты ставят между трубной доской и днищем или крышкой (рис. 3-35).

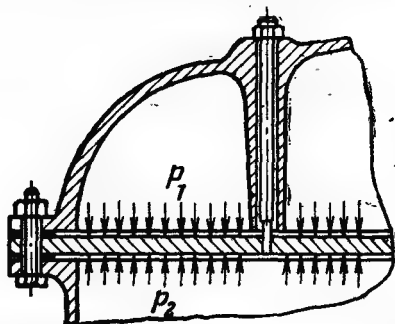


Рис. 3-35. Расположение анкерных болтов между трубной доской и днищем.

Для определения толщины трубной доски или плоской стенки используют эмпирическую формулу

$$s = C_1 \sqrt{p(a^2 + b^2)}, \quad (3-51)$$

где s — толщина стенки трубной доски, мм;

C_1 — коэффициент, выбираемый в зависимости от условий работы и закрепления связей в соответствии с табл. 3-10;

p — расчетный перепад давления по сторонам трубной решетки, кг/см²;

a — расстояние между центрами труб в одном ряду, мм;

b — расстояние между рядами труб, мм.

При неравномерном расположении анкерных связей толщину стенки определяют по формуле

$$s = 0,5C_1(t_1 + t_2)\sqrt{p}, \quad (3-52)$$

где t_1 и t_2 — расстояние между центрами связей (рис. 3-36);

C_1 — коэффициент, принимаемый по табл. 3-10.

Таблица 3-10

Значения коэффициента C_1 для различных случаев

Применительно к случаю	Коэффициент C_1
Для стенок, в которых распорные болты или трубы ввертываются на резьбе и расклепываются и которые омываются горячими газами и рабочим телом	0,017
Для случая, аналогичного предыдущему, но с тем отличием, что стенка не омывается газами	0,015
Для стенок, в которых распорные болты или трубы ввертываются на резьбе и которые омываются газами и рабочей средой; при этом трубы или болты снабжаются наружными гайками или имеют точечные головки	0,0155
Для случая, аналогичного предыдущему, но при том условии, что стенки газами не омываются	0,0135
Для стенок, которые крепятся только анкерными трубками	0,014
Для случая, когда болты снабжаются гайками и шайбами, а стенки газами не омываются; при этом диаметр наружной шайбы должен составлять $\frac{2}{5}$ расстояния между креплениями и толщина шайбы равна $\frac{2}{3}$ толщины стенки	0,013
Для того же случая, но при диаметре наружной шайбы, равном $\frac{3}{5}$ расстояния между креплениями, и толщине шайбы, равной $\frac{5}{6}$ толщины стенки	0,012
Для того же случая, но при диаметре наружной шайбы, равном $\frac{4}{5}$ расстояния между креплениями, и толщине шайбы, равной толщине стенки; при этом шайба должна быть приварена или приклепана к стенке	0,011

Формулы (3-51) и (3-52) справедливы, если трубные доски выполнены из стали с временным сопротивлением 36 кг/мм^2 . При использовании более прочной стали толщина стенки может быть уменьшена в отношении

$$\sqrt{\frac{36}{\sigma_B^t}}.$$

При укреплении завальцованными анкерными трубами, воспринимающими значительные нагрузки, следует проверить величину удельной силы, приходящейся на 1 пог. см окружности трубы, развальцованной в трубной доске.

Анкерные связи рекомендуются крепить гайками и шайбами с каждой

стороны доски. Иногда анкерные болты ставят на резьбе и расклепывают снаружи, а анкерные трубы — на резьбе с последующей развальцовкой.

3-17. РАСЧЕТ АНКЕРНЫХ СВЯЗЕЙ

Площадь f поперечного сечения анкерных труб или болтов, работающих на растяжение, должна удовлетворять условию

$$f \geq \frac{F - \frac{\pi d^2}{4}}{100 \sigma_{\text{доп}}} p,$$

где d — диаметр отверстия в трубной доске для анкерного болта или анкерной трубы, мм;

f — площадь наименьшего поперечного сечения анкерного болта или анкерной трубы, мм^2 ;

F — площадь трубной доски, укрепляемая данным анкерным болтом или анкерной трубой, мм^2 ;

p — расчетное давление, кг/см^2 .

$\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение, кг/мм^2 .

Допускаемое напряжение определяется по формуле

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_B^t}{6},$$

где σ_B^t — временное сопротивление материала анкерной связи при заданной температуре.

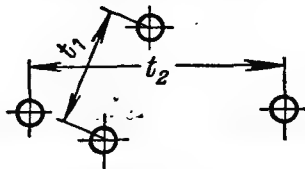


Рис. 3-36. Неравномерное расположение анкерных связей.

Если анкерные трубы или болты работают на сжатие, их следует проверить на устойчивость. Сжимающая сила, действующая на одну связь, должна быть меньше критической (с учетом коэффициента запаса устойчивости)

$$P \leq \frac{P_{\text{кр}}}{n_y},$$

Значения коэффициента φ в зависимости от гибкости анкерных связей

Гибкость λ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Коэффициент φ	1,0	0,99	0,96	0,94	0,92	0,89	0,86	0,81	0,75	0,69	0,60
Гибкость λ	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	—
Коэффициент φ	0,52	0,45	0,40	0,36	0,32	0,28	0,26	0,23	0,21	0,19	—

где n_y — запас устойчивости, принимаемый обычно равным 5;

$P_{кр}$ — критическая сила.

В любом случае нагрузка на одну анкерную связь не должна превышать 7 000 кг.

Для расчета центрально сжатого стержня на устойчивость применяют формулу

$$f \geq \frac{n_y F p}{\varphi_{доп}},$$

где f — площадь поперечного сечения стержня, мм²;

F — площадь трубной доски, приходящаяся на одну анкерную связь, см²;

p — перепад давления по сторонам трубной решетки или плоской стенки, кг/см².

В табл. 3-11 приведены величины коэффициента φ в зависимости от гибкости анкерной связи

$$\lambda = \frac{\alpha l}{i_{мин}},$$

где α — коэффициент, зависящий от способа закрепления связи, принимаемый равным 0,5 при развальцовке и креплении на резьбе или сваркой;

l — расстояние между трубными досками или плоскими стенками;

$i_{мин}$ — минимальный радиус инерции сечения анкерной трубы или анкерного болта.

Для круглого болта $i_{мин} = d/4$, для

$$\text{трубы } i_{мин} = \frac{d_n}{4} \sqrt{\frac{1 - d_b^2}{d_n^2}}.$$

Гибкость сжатых анкерных связей более 200 не допускается.

3-18. ПРОЧНОСТЬ ГИБОВ ТРУБ

В местегиба толщина стенки трубы становится тоньше с наружной стороны и толще с внутренней. Сечение трубы в местегиба приобретает эллиптичность, поэтому гиб не равнопрочен прямому участку. В «Нормах расчета элементов паровых котлов на прочность» при расчете толщины стенки трубы, имеющей гиб, величину C , принимают по формуле

$$C = A_1 (s - C),$$

где коэффициент A_1 выбирают по табл. 3-12, а $(s - C)$ — расчетная толщина стенки без учета добавки.

Таблица 3-12

Значения коэффициента A_1 в зависимости от допуска на толщину стенки трубы

Допуск на толщину стенки трубы, %	+15 -15	+15 -10	+20 -10	+20 -5	+25 -5
Коэффициент A_1	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10

Добавляемая величина C во всех случаях должна быть не менее 0,5 мм. Если необходимо учесть коррозионное разрушение, ее соответственно увеличивают.

Определенная таким образом величина C включает компенсацию утонения стенки в гibaх труб, если относительный радиус гiba r по средней линии¹ составляет не менее 3,5 для трубопроводов и кипящих труб и не менее 2 для змеевиков. При относительных радиусах гибов менее указанных величин коэффициент A_1

¹ Относительный радиус гiba — отношение радиуса гiba, взятого по средней окружности трубы, к ее наружному диаметру.

должен быть умножен на $3,5 D_H/\rho$ для трубопроводов и кипятильных труб и на $2 D_H/\rho$ для змеевиков.

Опыты, проведенные в МЭИ, показали, что под действием внутреннего давления металл гiba переходит в пластическое состояние раньше, чем металл цилиндрического участка той же трубы. Пластическая деформация гiba сама по себе не представляет большой опасности, в результате ее уменьшается эллиптичность сечения в месте гiba и надежность трубы не снижается. Разрушающее давление для гбoв змеевиков с радиусом гiba более двух наружных диаметров хорошо совпадает с величиной разрушающего давления для цилиндрических участков. Если относительный радиус меньше 2, разрушение происходит по гibu при давлении несколько ниже разрушающего для цилиндрического участка. Следовательно, методика, применяемая в нормах, хорошо согласуется с экспериментом.

3-19. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА САМОКОМПЕНСАЦИЮ

По трубопроводам часто транспортируют теплоносители, температура которых существенно отличается от температуры окружающей среды в рассматриваемый момент в период монтажа.

При прогреве линейные размеры трубопровода стремятся увеличиться. Однако этому в большинстве случаев препятствует жесткая связь концов трубопровода с неподвижным оборудованием. Тепловые расширения не могут быть скомпенсированы путем смещения концов трубопровода на величину теплового расширения, и в них возникают добавочные тепловые напряжения. При расчете на самокомпенсацию определяют моменты и силы, возникающие по концам трубопровода, а также проверяют его прочность.

При определении тепловых напряжений выполняют расчет свободного расширения трубопровода, представляющего собой расширение относительно некоторой фиксированной точки, которое имело бы место при отсутствии препятствий для расширения. Компоненты этого расширения удобно вычислять по проекциям расстояния между опорами на оси координат (рис. 3-37).

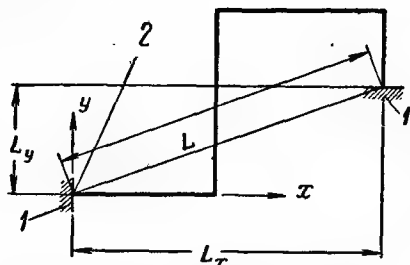


Рис. 3-37. Схема теплового расширения трубопровода.

L_y — проекция трубопровода на ось y для расчета Δy ;
 L_x — проекция трубопровода на ось x для расчета Δx ;
 L — расстояние между неподвижными опорами;
 1 — неподвижные опоры; 2 — начало координат.

Тепловое расширение в направлении оси x может быть определено как

$$\Delta x = e L_x,$$

где e — удельное линейное тепловое расширение при разности температур Δt (разность температур трубопровода в период монтажа и в рассматриваемый момент);

L_x — проекция расстояния между опорами на ось x .

Удельное линейное тепловое расширение большинства сталей почти пропорционально изменению температуры. В первом приближении можно считать, что

$$e = \alpha \Delta t,$$

где α — коэффициент пропорциональности. Этот коэффициент практически постоянен для углеродистых, перлитных низколегированных молибденовых и аустенитных хромоникелевых сталей. Для упрощения расчетов на рис. 3-38 приведена зависимость величины удельного линейного теплового расширения от разности температур Δt . Начальной принята температура $(+20^\circ \text{C})$, так как трубопровод обычно монтируют при близких к ней температурах. Если температура изменяется по длине трубопровода, то его расчетную температуру можно принимать как среднюю арифметическую из температур его концов.

Аналогично можно найти величину теплового расширения в направлении оси y

$$\Delta y = e L_y$$

Результирующее тепловое расширение

$$\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}.$$

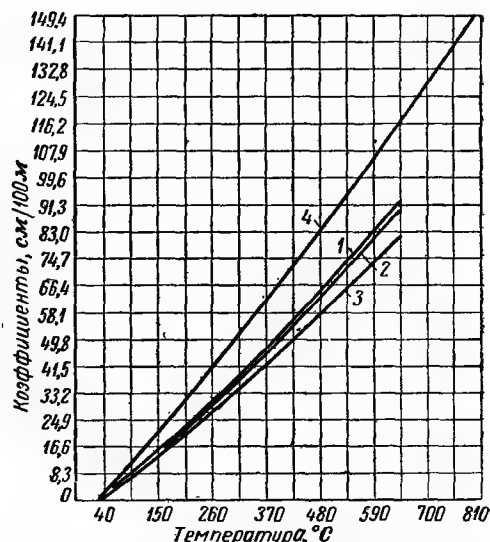


Рис. 3-38. Зависимость удельного линейного теплового расширения от температуры.

1 — углеродистые стали, стали с 0,5% молибдена и стали с 0,5% хрома и 0,5% молибдена; 2 — стали, содержащие от 1 до 3% хрома и от 0,5 до 1% молибдена; 3 — стали, содержащие от 4 до 10% хрома и от 0,5 до 1,5% молибдена; 4 — сталь, содержащая 18% хрома и 8% никеля.

Точные методы расчета на самокомпенсацию очень трудоемки, в то же время, если выполняются определенные условия, во многих случаях с достаточной степенью точности можно выполнять расчет приближенным методом. Так, расчет значительно упрощается, если принять, что отдельные участки трубопровода сопрягаются под прямыми углами жестко, без возможности поворота сечений. В действительности прямые участки трубопроводов сопрягаются посредством гибов, которые способствуют самокомпенсации и уменьшают жесткость системы. Принятое выше допущение приводит к завышению опорных сил и моментов, а также напряжений самокомпенсации, возникающих в трубопроводе.

Ниже излагается один из приближенных методов расчета, применяемый при соблюдении следующих условий:

- 1) все прямые участки трубопровода сопряжены жестко под прямыми углами;
- 2) система имеет только две точки опоры;
- 3) система состоит из прямых участков, имеющих одинаковые размеры в поперечном сечении;

- 4) все прямые участки трубопровода расположены параллельно осям некоторой прямоугольной системы координат; при этом система может быть как плоской, так и пространственной.

Можно допустить, что в такой системе тепловое расширение в данном направлении поглощается только участками, перпендикулярными к этому направлению. Величина теплового расширения, которая может быть поглощена данным участком, обратно пропорциональна его жесткости. Так как все участки имеют одинаковое поперечное сечение, их жесткость пропорциональна кубу длины.

Далее примем дополнительное допущение, что под действием теплового расширения концы прямых участков смещаются совместно, но поворота концов не происходит. Это условие иллюстрируется рис. 3-39 на примере простой двухчленной системы.

Согласно принятым допущениям отдельные участки поглощают следующие тепловые расширения в направлении оси x

$$\delta_x = \frac{L^3}{\Sigma L^3 - \Sigma L_x^3} \Delta_x, \quad (3-53)$$

где δ_x — прогиб рассматриваемого участка в направлении оси, см;
 L — длина рассматриваемого участка, см;
 Δ_x — общее тепловое удлинение системы в направлении оси x , см;

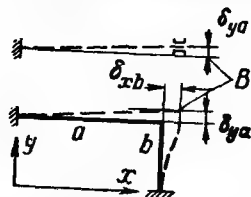


Рис. 3-39. Возможные деформации согласно принятым в тексте допущениям для системы, расположенной в одной плоскости.

δ_{xb} — удлинение плеча a , Δ_x ; δ_{ya} — удлинение плеча b , Δ_y .

$\Sigma L^3 - \Sigma L_x^3$ — сумма кубов плеч, перпендикулярных к рассматриваемому направлению; в данном случае имеются в виду участки, параллельные осям y и z .

Аналогичные уравнения могут быть написаны для боковых прогибов в направлении осей y и z . Распределение тепловых расширений отдельных участков пространственных систем показано схематически на рис. 3-40.

Величина максимального допустимого прогиба консоли, показанного на рис. 3-39, может быть определена как

$$\delta = \frac{0,333L^2\sigma'_{\text{доп}}}{ED}, \quad (3-54)$$

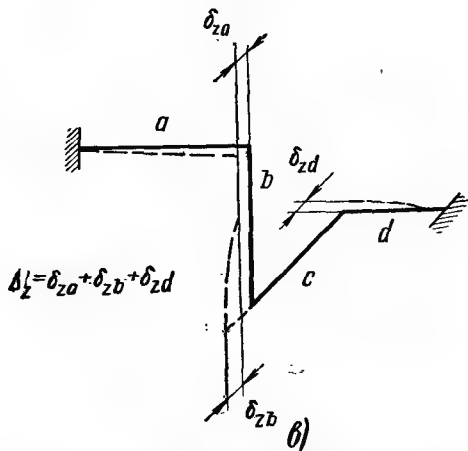
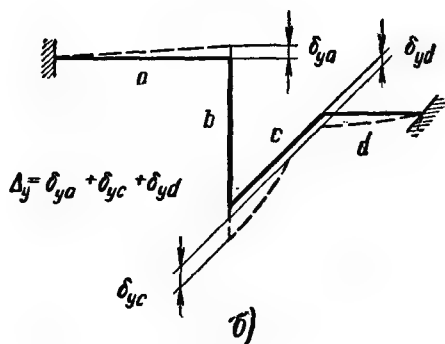
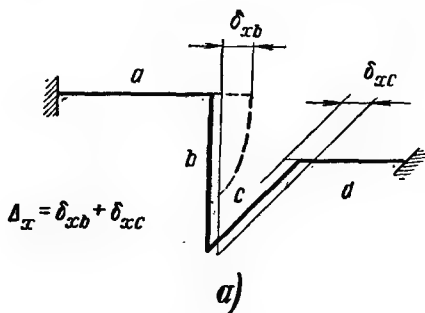
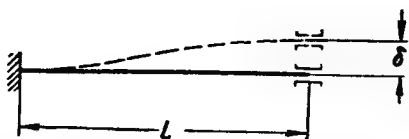


Рис. 3-40. Возможные деформации в пространственной системе при принятых допущениях. Δ_x , Δ_y , Δ_z — температурные расширения соответственно в направлениях осей x , y и z ; a — расширение в направлении оси x ; b — то же в направлении оси y ; c — то же в направлении оси z .



меньше δ , то каждый участок имеет достаточный запас прогиба. Такую систему можно рассматривать как достаточно гибкую.

Если величина δ_x , δ_y или δ_z превысит допустимую, необходимо произвести уточненный расчет с учетом снижения момента в месте

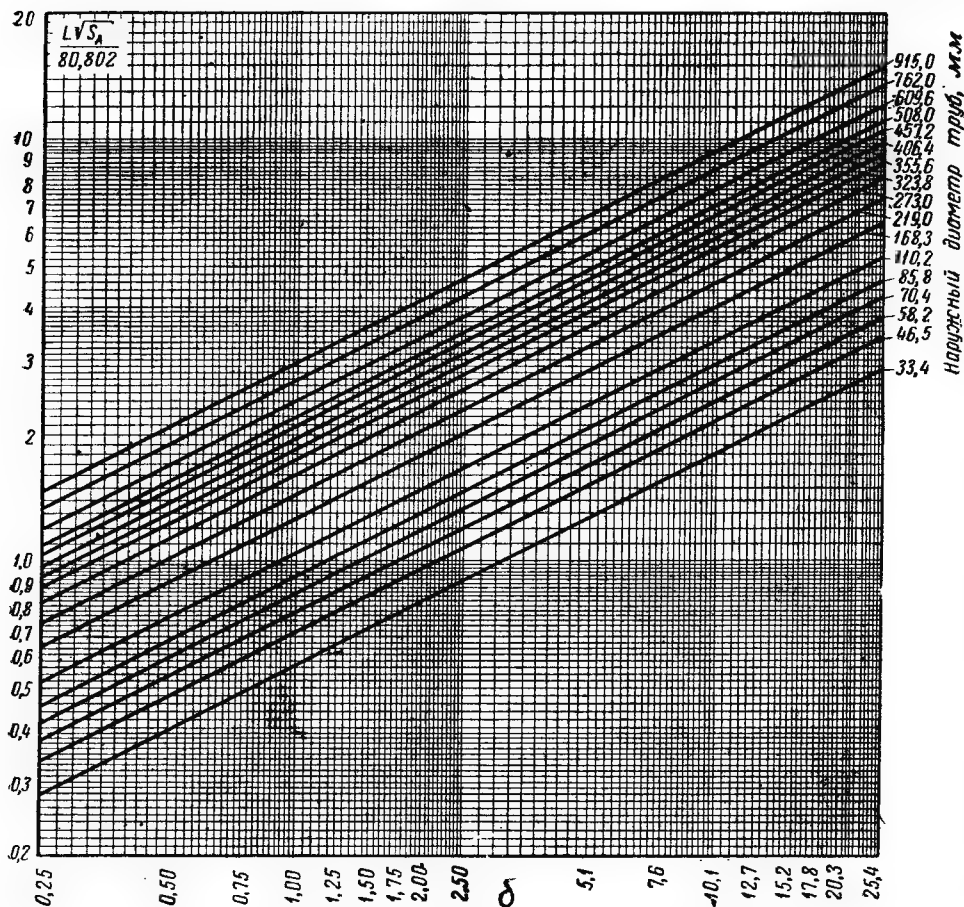


Рис. 3-41. Номограмма для определения величины прогибов.

L — длина плеча, см; δ — боковой прогиб, см;

Примечания: 1. Величина модуля упругости первого рода принята равной $E=2,04 \cdot 10^6$ кг/см². 2. Для определения величины бокового прогиба необходимо сначала определить величину $L \sqrt{\sigma_{\text{доп}}/80,802}$. Эту величину следует отложить по оси ординат. Далее по горизонтали сносим эту точку с оси ординат на кривую, соответствующую наружному диаметру трубопровода. Точку пересечения с кривой по вертикали проектируем на ось абсцисс, где и определяем величину максимально допустимого бокового прогиба в сантиметрах.

где δ — максимальный допускаемый прогиб участка, см;

$\sigma_{\text{доп}}$ — условное допускаемое напряжение на изгиб, равное $1,25 \sigma_{\text{доп}}$ кг/см²;

L — длина участка, см;

E — модуль упругости, кг/см²;

D — наружный диаметр трубы, см.

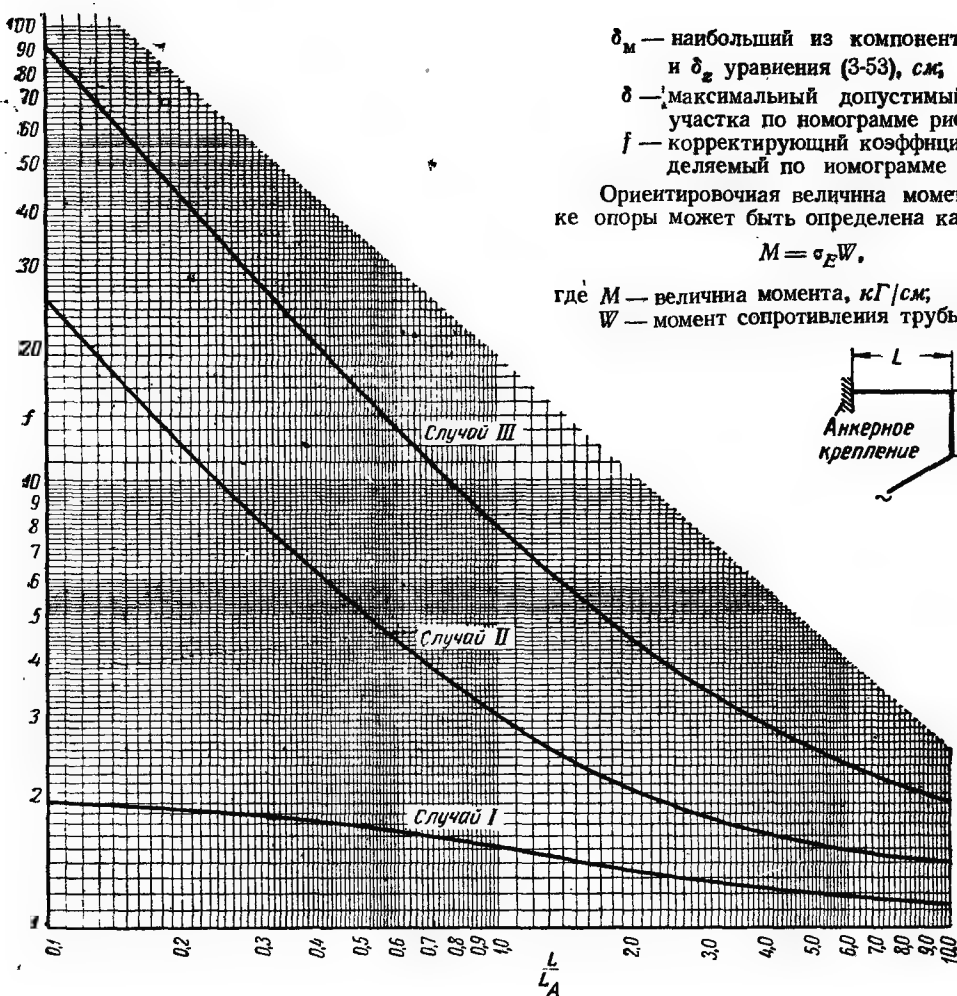
Для удобства пользования это уравнение представлено на рис. 3-41 в виде номограммы, в основу которой положена величина $E=2,04 \times 10^6$ кг/см².

Предварительно для всех участков определяют величины δ_x , δ_y и δ_z из уравнения (3-53) и δ из уравнения (3-54) или по номограмме, приведенной на рис. 3-41. Если δ_x , δ_y и δ_z

пересечения прямых участков. Для этого вводят коэффициент f , величину которого определяют по номограмме, приведенной на рис. 3-42, в зависимости от местоположения соответствующего участка и его длины относительно соседних участков. Если уточненная величина максимального допустимого прогиба участка больше δ_m^1 , то его можно рассматривать как достаточно гибкий.

Отношение $\delta_m : f \delta$ показывает, какой доли условного допускаемого напряжения достигают напряжения в трубе из-за тепловой компенсации. Это позволяет оценивать величину

¹ Здесь δ_m — наибольшая величина из δ_x , δ_y и δ_z .



δ_m — наибольший из компонентов δ_x , δ_y и δ_z уравнения (3-53), см;
 δ — максимальный допустимый прогиб участка по номограмме рис. 3-41;
 f — корректирующий коэффициент, определяемый по номограмме рис. 3-42.

Ориентировочная величина момента в точке опоры может быть определена как

$$M = \sigma_E W, \quad (3-56)$$

где M — величина момента, кгГ/см;
 W — момент сопротивления трубы, см³.

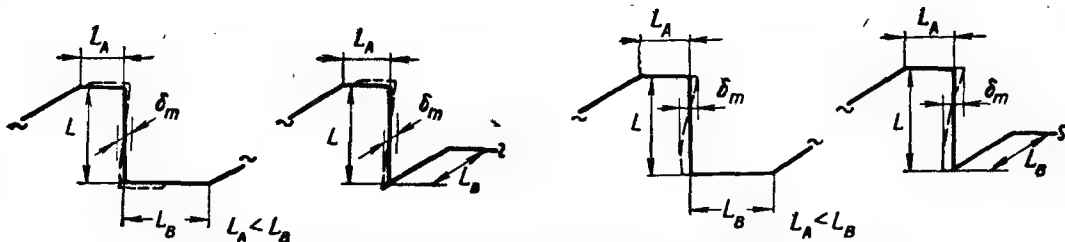
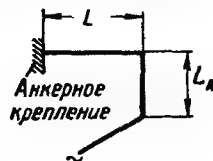


Рис. 3-42. Номограмма для определения поправочного коэффициента f .

Случай I. Для одного из крайних участков L .

Случай II. Для одного из средних участков L , максимальный прогиб которого находится в плоскости L и L_A , где L_A — наиболее короткий из соседних участков.

Случай III. Для одного из средних участков, максимальный прогиб которого расположен в плоскости, перпендикулярной к плоскости участков L и L_A , где L_A — наиболее короткий из соседних участков. L — длина рассматриваемого участка; L_A — длина наиболее короткого соседнего участка.

действующих на участке напряжений по формуле

$$\sigma_E = \frac{\delta_m}{f\delta} \sigma'_{\text{доп}} \quad (3-55)$$

где σ_E — приближенная величина максимального напряжения на рассматриваемом участке, кгГ/см²;

$\sigma'_{\text{доп}}$ — условное допускаемое напряжение, кгГ/см²;

Рассматриваемый метод расчета прост и может быть применен для трубопроводов различной конфигурации, имеющих две неподвижные точки опоры. Точность расчета уменьшается в тех случаях, когда система состоит из участков, очень отличающихся по длине, или когда в дополнение к температурным расширениям имеет место перемещение точек опоры. Однако ошибка получается обычно в сторону увеличения надежности.

3-20. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

а) Расчет паротермического агрегата

Рассмотрим расчет на прочность паротермического агрегата, применяемого в пищевой промышленности (рис. 3-43).

Агрегат предназначен для ошпаривания и очистки картофеля при массовой переработке. Через загрузочный патрубок 3 с крышкой 4 в корпус 1 загружается картофель, после чего крышка плотно закрывается. При помощи электродвигателя 7 через редуктор 8 барабан приводится во вращение. В это же время через подводящий патрубок 5 внутрь барабана начинает поступать насыщенный пар под давлением 5 атм. Скорость вращения барабана 6 об/мин, объем 850 л.

Барабан имеет цилиндрический корпус 1 и эллиптические днища 2.

Корпус должен быть изготовлен из листовой стали марки Ст. 3. Температура стенки корпуса близка к температуре насыщенного пара при 5 атм, т. е. около 158°С.

Для расчета на прочность цилиндрической части барабана необходимо определить допускаемые напряжения. По табл. 2-1 определяем допускаемое напряжение для стали Ст. 3 в интервале температур от 20 до 200°С: $\sigma_{\text{доп}} = 14,7 \text{ кг/мм}^2$. Это напряжение может быть принято при расчете цилиндрического корпуса по формуле (3-14) в том случае, если сосуд подвержен только внутреннему давлению. В рассматриваемом случае на цилиндрическую часть корпуса действует изгибающая нагрузка от веса картофеля, загруженного в барабан, и частично сконденсировавшихся паров, а также неуравновешенная центробежная сила от этой нагрузки. Дополнительные нагрузки трудно учесть непосредственно, поэтому их учитывают косвенно путем снижения допускаемого напряжения в 2,25 раза. Принимаем $\sigma_{\text{доп}} = 6,5 \text{ кг/мм}^2$.

Толщина стенки без учета ослабления ее патрубком может быть найдена по формуле

$$s_0 = \frac{D_{\text{в}} p}{230 \varphi \sigma_{\text{доп}} - p} + C,$$

где $D_{\text{в}}$ — внутренний диаметр барабана, мм;
 p — внутреннее избыточное давление, кг/см^2 ;

φ — коэффициент ослабления; так как корпус сварен в стык при помощи автоматической сварки под флюсом с подваркой, $\varphi = 1$;

$\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение, кг/мм^2 ;

C — величина, добавляемая на минусовый технологический допуск, коррозию и износ.

Принимаем $C = 1,5 \text{ мм}$, тогда

$$s_0 = \frac{875 \cdot 5}{230 \cdot 1 \cdot 6,5 - 5} + 1,5 = 4,44 = 4,5 \text{ мм}.$$

Проверим далее, нужно ли укреплять отверстие в цилиндрической части корпуса в месте приварки загрузочного патрубка.

Максимальный допускаемый диаметр не укрепленного отверстия можно определить как

$$d_{\text{пред}} = 8,1 \sqrt{D_{\text{в}} (s_0 - C) (1 - K)},$$

где

$$K = \frac{p D_{\text{в}}}{(230 \sigma_{\text{доп}} - p) (s_0 - C)} = \frac{5 \cdot 875}{(230 \cdot 6,5 - 5) (4,5 - 1,5)} = 0,98.$$

Далее находим предельный допускаемый диаметр неукрепленного отверстия

$$d_{\text{пред}} = 8,1 \sqrt{875 (4,5 - 1,5) (1 - 0,98)} = 30,4 \text{ мм}$$

Следовательно, отверстие необходимо укрепить. Для этого применим толстостенный патрубок толщиной 13 мм и увеличим толщину стенки цилиндрического корпуса до 8 мм. Проверим, достаточно ли такое усиление. При укреплении отверстия толстостенным патрубком должно быть выполнено условие

$$\Delta^2 + 2h \left(s_1 - \frac{p d}{230 \sigma_{\text{доп}} - p} \right) + d (s - s_0) \geq d s_0.$$

Высота сварного шва $\Delta = 8 \text{ мм}$, величина $h = 2,5 \cdot 8 = 20 \text{ мм}$, диаметр отверстия $d = 420 \text{ мм}$. Поэтому условие прочности в данном случае получается следующим:

$$8^2 + 2 \cdot 20 \left(13 - \frac{5 \cdot 420}{230 \cdot 6,5 - 5} \right) + 420 (8 - 4,5) \geq 420 \cdot 4,5.$$

После преобразований

$$1998 > 1890,$$

т. е. условие прочности выдержано.

Проверять прочность приварного загрузочного патрубка под действием внутреннего давления нет необходимости, так как расчетная толщина стенки цилиндрического корпуса при внутреннем давлении 875 мм без учета ослабления получилась равной 4,5 мм. Внутренний же диаметр патрубка почти в 2 раза меньше; а толщина стенки равна 13 мм.

Далее определим силу, действующую на накидные болты, крепящие плоскую крышку к загрузочному патрубку. Сначала найдем величину этих сил из условия обеспечения герметичности до приложения давления. Прокладка изготовлена из прессованного асбеста. Необходимое предварительное удельное давление на прокладку согласно табл. 3-10 составляет 150 кг/см^2 . Средний диаметр прокладки 440 мм, ширина 17,5 мм.

Для обеспечения плотности соединения сила, сжимающая прокладку при отсутствии внутреннего давления, должна быть не менее

$$Q_{\text{п}} = \pi D_{\text{ср}} b' q_{\text{п}},$$

отсюда

$$Q_{\text{п}} = \pi \cdot 44 \cdot 1,75 \cdot 0,5 \cdot 150 = 18200 \text{ кг}.$$

Все линейные размеры приняты в сантиметрах, так как в табл. 3-10 удельное давление на прокладку приведено в кг/см^2 . Коэф-

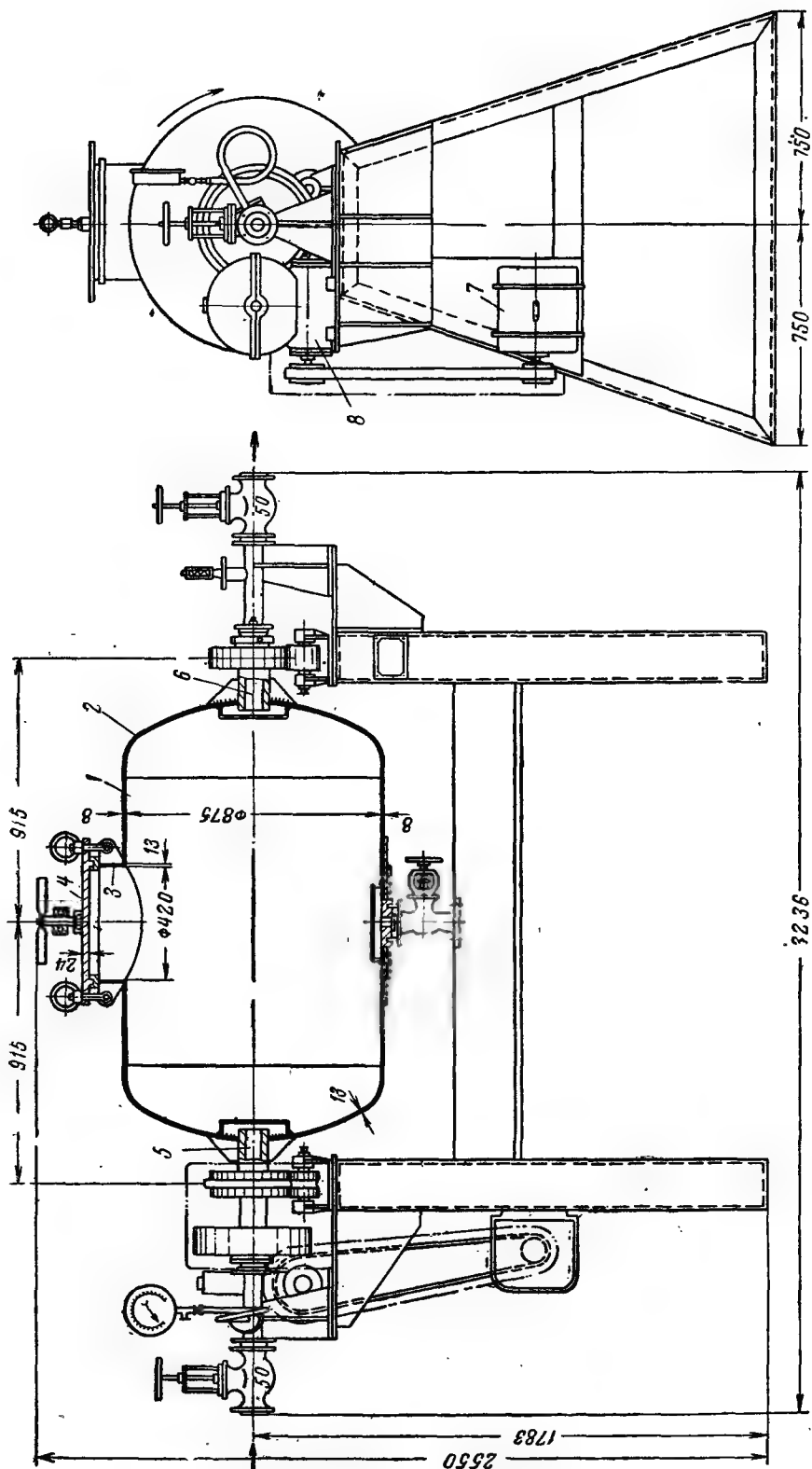


Рис. 3.43. Паротермический агрегат.

коэффициент 0,5 учитывает, что действительная площадь соприкосновения прокладки с крышкой и фланцем меньше геометрической приблизительно в 2 раза.

Далее определим силу, которую должны создавать для обеспечения плотности накидные болты в рабочих условиях при внутреннем избыточном давлении 5 атм.

Сила, компенсирующая внутреннее давление, равна:

$$Q_1 = \frac{\pi D_{\text{ср}}^2}{4} p = \frac{\pi \cdot 44^2 \cdot 5}{4} = 7600 \text{ кг.}$$

Сила, необходимая для создания плотности соединения,

$$Q_2 = \pi D_{\text{ср}} b_0 p = \pi \cdot 44 \cdot 1,75 \cdot 2,5 = 2320 \text{ кг.}$$

Полиная сила, действующая на болты,

$$Q = Q_1 + Q_2 = 9920 \text{ кг.}$$

Так как сила, необходимая для уплотнения соединения при отсутствии внутреннего давления, получилась больше, чем при наличии давления, в дальнейшем расчет накидных болтов выполняем по первой, большей силе.

Накидные болты имеют резьбу М24. Минимальное сечение болта М24

$$f_6 = \frac{\pi}{4} d_1^2 = \frac{\pi \cdot 21,3^2}{4} = 356 \text{ мм}^2.$$

Болты изготовлены из стали Ст.3, для которой $\sigma_{\text{доп}}^* = 13 \text{ кг/мм}^2$ в интервале 20—220° С. Допускаемая сила на один болт

$$q_{\text{ш}} = f_6 \sigma_{\text{доп}} = 356 \cdot 13 = 4630 \text{ кг.}$$

Необходимое число болтов

$$n \geq \frac{Q_{\text{п}}}{q_{\text{ш}}} = \frac{18200}{4630} = 3,93.$$

Принимаем $n = 4$.

Плоскую крышку загрузочного патрубکا рассчитываем по формуле (3-43):

$$s_1 = D \sqrt{\frac{Kp}{100\sigma_{\text{доп}}}} + C,$$

где

$$K = 0,3 + \frac{1,4Q_{\text{п}}b}{Q_1 D} = 0,3 + \frac{1,4 \cdot 18200 \cdot 17,5}{7600 \cdot 440} = 0,433.$$

Расчетная толщина стенки крышки

$$s_1 = 422 \sqrt{\frac{0,433 \cdot 5}{100 \cdot 13}} + 1,5 = 17,3 + 1,5 = 18,8 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину крышки равной 20 мм.

Далее проверим прочность эллиптических днищ. Так как отверстие от подводящего и отводящего патрубков укреплены толстостенными штуцерами, воспользуемся формулой для определения толщины глухого днища:

$$s = \frac{pD_{\text{в}}}{400\sigma_{\text{доп}} - p} \frac{D_{\text{в}}}{2h_{\text{в}}} + C;$$

Здесь $h_{\text{в}}$ — высота эллиптической части днища.

В данном случае $h_{\text{в}} = 175 \text{ мм}$. Остальные величины известны из предыдущего расчета. Подставим их значения в формулу для определения толщины стенки глухого днища

$$s_1 = \frac{5 \cdot 875}{400 \cdot 6,5 - 5} \frac{875}{2 \cdot 180} + 1,5 = 5,6 \text{ мм.}$$

Из конструктивных и технологических соображений принимаем толщину стенки днища равной 13 мм.

б) Расчет водоводяного подогревателя (рис. 3-44)

Рассчитаем на прочность водоводяной подогреватель типа ВТИ — Мосэнерго ВВП-100, предназначенный для работы при максимальной температуре 150° С и рабочем давлении 10 атм. Вода с температурой 150° С циркулирует по тонким латунным трубам.

Проверим прочность корпуса, выполненного из труб наружным диаметром 114 мм и толщиной стенки 4 мм в месте приварки отвода из трубы наружным диаметром 89 мм и толщиной стенки 3,5 мм. Обе трубы бесшовные горячекатаные по ГОСТ 8732-58 изготовлены из стали марки Ст.3.

Сначала определим необходимую толщину стенки корпуса водоводяного подогревателя без учета ослабления его патрубком

$$s_0 = \frac{D_{\text{н}} p}{230\sigma_{\text{доп}} + p} + C,$$

где $D_{\text{н}}$ — наружный диаметр корпуса, мм;

p — внутреннее рабочее давление, кг/см²;

$\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение при рабочей температуре, кг/мм²;

C — добавляемая величина, мм.

Допускаемое напряжение для стали Ст.3 в интервале температур от 20 до 200° С согласно табл. 2-1 равно 13 кг/мм². Добавляемая величина C может быть определена как

$$C = A(s_0 - C).$$

Труба, служащая для изготовления корпуса, изготовлена с обычной точностью +12,5—15% по толщине стенки. При минусовом допуске 15% согласно табл. 3-6 коэффициент A равен 0,18:

$$C = 0,18(s_0 - C),$$

но

$$s_0 - C = \frac{D_{\text{н}} p}{230\sigma_{\text{доп}} + p},$$

следовательно,

$$C = 0,18 \frac{D_{\text{н}} p}{230\sigma_{\text{доп}} + p}$$

или

$$s_0 = 1,18 \frac{D_{\text{н}} p}{230\sigma_{\text{доп}} + p}.$$

После подстановки получим величину

$$s_0 = 1,18 \frac{114 \cdot 10}{230 \cdot 13 + 10} = 0,46 \text{ мм.}$$

Проверим, достаточно ли укреплено отверстие:

$$\Delta^2 + 2h \left(s_1 - \frac{pd}{230\sigma_{\text{доп}} - p} \right) + d(s - s_0) \geq ds_0;$$

здесь Δ — высота катета сварного шва, крепящего патрубок к корпусу *мм*;

s — толщина стенки патрубка, *мм*;

h — расчетная высота усиливающего патрубка, *мм* ($h = 2,5$ $s_1 = 2,5 \cdot 3,5 = 8,8$ *мм*);

d — внутренний диаметр патрубка, *мм*;

s — действительная толщина стенки корпуса, *мм*.

$$6^2 + 2 \cdot 8,8 \left(3,5 - \frac{10 \cdot 82}{230 \cdot 13,0 - 10} \right) + 82(4 - 0,46) \geq 82 \cdot 0,46.$$

После арифметических преобразований получим:

$$382 > 38,$$

т. е. укрепление получилось с большим запасом. Принятые толщины стенок оставляем, так как по ГОСТ 8732-58 для выбранных наружных диаметров меньшие толщины стенок не предусмотрены.

Фланцы на корпусе и патрубке выбираем по ГОСТ 1255-54, в котором указаны размеры фланцев, необходимое число и диаметр шпилек.

Далее проверим прочность латунных труб при рабочей температуре 150°С и внутреннем избыточном давлении 10 *ати* (считаем, что давление внутри корпуса снизилось до атмосферного). Трубы выполнены из латуны Л68 по ГОСТ 494-52. Наружный диаметр труб 16 *мм*, толщина стенки 1 *мм*. Согласно табл. 3-2 допускаемое напряжение для латуны Л68 в интервале температур 141—160°С составляет 4,5 *кг/мм²*. На минусовый технологический допуск и коррозию добавляем величину $C = 0,5$ *мм*. Определяем необходимую толщину стенки

$$s = \frac{D_n p}{230\sigma_{\text{доп}} + p} + C$$

или

$$s = \frac{16 \cdot 10}{230 \cdot 4,5 + 10} + 0,5 = 0,65 \text{ мм}.$$

Далее рассчитаем на прочность трубные доски, имеющие жесткую конструкцию, одинаковые по форме, закреплению и размерам. Перепад давления в 10 *ати* действует со стороны воды, идущей по трубам. Трубы работают на сжатие и нагрузки не воспринимают, для этих условий толщину трубной доски определяем по формуле

$$s = \sqrt{\frac{Kp(D^2 - nd^2)}{100\sigma_{\text{доп}}\varphi}} + C;$$

здесь D — диаметр трубной доски, на который распространяется давление, *мм*;

K — коэффициент, равный 0,162;

p — перепад давления по сторонам трубной доски, *кг/см²*;

n — число труб в трубной доске;

φ — коэффициент ослабления решетки отверстиями

$$\varphi = \frac{b - d_n}{b} = \frac{21 - 16}{21} = 0,238;$$

$\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение (для стали марки Ст. 3 при температурах от 20 до 200°С оно равно 13 *кг/мм²*);

C — величина, добавляемая на коррозию (принимаем 2 *мм* — по 1 *мм* на сторону);

$$s = \sqrt{\frac{0,162 \cdot 10(106^2 - 19 \cdot 16^2)}{100 \cdot 13 \cdot 0,238}} + 2 = 7,8 \text{ мм}.$$

Проверяем на надежность развальцовку труб в стальной трубной доске

$$s_{\text{мин}} = 5 + 0,125d = 5 + 0,125 \cdot 16 = 7 \text{ мм}.$$

По конструктивным соображениям принимаем толщину трубной доски равной 22 *мм*, так как она выполняется заодно с фланцем, а приварной фланец по ГОСТ 1255-54 на условное давление 10 *кг/мм²* при условном проходе 100 *мм* имеет толщину 22 *мм*.

Далее определим, выполнено ли условие надежности вальцовочного соединения по сечению мостика между отверстиями. Площадь мостика должна быть больше или равна минимально допускаемой

$$f_{\text{мин}} = 4,8d_n$$

или

$$f_{\text{мин}} = 4,8 \cdot 16 = 77 \text{ мм}^2.$$

В нашем случае

$$f = 22 \cdot 5 = 110 \text{ мм}^2.$$

Следовательно, условие надежности вальцовочного соединения выполнено.

Остается проверить прочность конического перехода. Толщина стенки перехода должна быть не менее

$$s_1 = \frac{pD_n}{200\sigma_{\text{доп}}\varphi_{\text{св}} \cos \alpha} + C.$$

Переход имеет продольный сварной шов, выполненный сваркой под флюсом с одной стороны. При таком способе сварки коэффициент прочности шва не должен превышать 0,8. Поэтому

$$s_1 = \frac{10 \cdot 106}{200 \cdot 13 \cdot 0,8 \cdot 0,995} = 0,51 \text{ мм}.$$

Из конструктивных и технологических соображений принимаем $s_1 = 4$ *мм*.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для изготовления теплообменников* применяют сравнительно ограниченный комплект основных элементов и узлов.

Почти все теплообменники (кроме оросительных) имеют корпус, выполняемый обычно разъемным и состоящий из кожуха, крышек и днищ. Кожухи выполняются обычно цилиндрическими; значительно реже кожухи изготавливают в форме параллелепипедов, конусов, сфер и иных тел вращения. Крышки и днища бывают плоские, выпуклые и вогнутые — эллиптические, сферические и др. Кожух соединяется с крышками и днищами с помощью фланцев или жестким швом (сварка, клепка). К корпусам приваривают или прикрепляют другим способом штуцера и бобышки для присоединения трубопроводов, арматуры и контрольно-измерительной аппаратуры, лапы и опоры для установки и крепления аппарата на месте. На корпусе имеются лазы и люки для проведения ремонта и смотровые окна для наблюдения за процессом.

Каждый теплообменный аппарат имеет устройство для передачи тепла. В рекуперативных теплообменных аппаратах для передачи тепла служат поверхности теплообмена, имеющие в зависимости от способа подвода тепла, вида энергии и характера теплоносителя различную конструктивную форму. При газопарожидкостном обогреве наиболее часто поверхность теплообмена выполняется в виде: рубашек на корпусе аппарата; змеевиков из труб на корпусе или внутри корпуса; прямых или гнутых гладких труб — трубчаток; плавниковых или оребренных поверхностей нагрева, встраиваемых внутри аппарата с помощью трубных досок, коллекторов или других укрепляющих устройств.

В последние годы получили распространение компактные спиральные и пластинчатые теплообменники.

В отдельных случаях в теплообменных аппаратах используются мешалки, скребки, питатели, шлюзовые затворы и другие устройства.

Теплообменные аппараты обычно изготавливают специализированные заводы. Значительная часть продукции этих заводов нормализована и представлена в каталогах и ценниках. Кроме специализированных заводов, теплообменники изготавливают по индивидуальным заказам и чертежам неспециализированные машиностроительные заводы и мастерские.

Независимо от места проектирования и изготовления теплообменные аппараты, предназначенные для работы под давлением выше 0,7 *ати*, в отношении устройства, монтажа и эксплуатации должны соответствовать правилам Госгортехнадзора.

Не подлежат контролю Инспекции Госгортехнадзора следующие сосуды:

а) водогрейные котлы и приборы парового и водяного отопления;

б) сосуды, для которых произведенные емкости в литрах на рабочее давление в избыточных атмосферах не превышает 500, причем рабочее давление не превышает 16 *ати*, а температура 200° С;

в) части машин, не представляющие самостоятельных сосудов (цилиндры паровых машин, сепараторы пара, сухопарники и т. д.);

г) экспериментальные сосуды емкостью до 25 л независимо от давления и температуры;

д) сосуды, работающие под вакуумом;

е) сосуды, работающие под любым давлением воды и неядовитых жидкостей при температуре, не превышающей температуру их кипения при атмосферном давлении.

В соответствии с «Правилами устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением» за правильность конструкции сосуда, его расчет на прочность и выбор материала отвечает организация, разрабатывающая конструкцию и выполнившая ее расчет.

Рабочие чертежи служат основным производственным документом, по которому изготавливаются детали аппарата и производится его сборка. В рабо-

чих чертежах указываются материалы, из которых изготавливаются детали аппарата. Все изменения, могущие возникнуть в процессе изготовления или монтажа сосуда, должны быть согласованы между организацией, составляющей проект, и организацией, потребовавшей изменение проекта, оформлены в виде протокола и подписаны обеими сторонами.

Сосуды, на которые распространяется действие правил Госгортехнадзора, по требованиям, предъявляемым к проектированию, качеству основного материала, качеству сварки, технологии изготовления и запасам прочности, разделяются на 5 категорий, приведенных в табл. 4-1. При отсутствии в таблице нужного сочетания параметров для определения категории сосуда руководствуются большим параметром. Сосуды, в которых повышение давления и температуры среды обусловлено химической реакцией продукта, относятся к сосудам III категории, если по температуре стенки они не должны быть отнесены к более высокой категории.

Таблица 4-1

Категории сосудов по допускаемым давлениям среды и температурам стенки

Категория сосудов	Допускаемое давление (нбл точное), кг/см ²	Температура стенки, °С	Допускаемые к применению стали
I II III	До 850	До 750 До 550 До 475	Легированные Легированные и качественные углеродистые
IV	До 50	До 350	Качественные углеродистые и углеродистые обыкновенного качества
V	До 16	До 200	Углеродистые обыкновенного качества

4.2. ЧУГУННЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

В качестве материала для изготовления теплообменных аппаратов чугуна получил довольно широкое распространение, особенно в химической промышленности. Литые чугунные теплообменники применяют для тепловых и технологических процессов с внутренним давлением до 6—8 атм и температурой стенки до 200° С.

Из серого чугуна изготавливают отопительные трубы-калориферы разных типов, ребристые трубы для водяных экономайзеров паровых котлов. В хи-

мической промышленности получили широкое распространение аппараты из высококремнистого чугуна (12—18% кремния и 0,6—0,2% углерода) — ферросилид, термосилид, айронак, дюрайрон и др. Из этого химически стойкого чугуна изготавливают концентрационные и денитрационные колонны, смесители, конденсаторы, распылители кислот, центробежные насосы, реторты, чаны, трубы и другое оборудование, применяемое в производстве серной, азотной, уксусной, фосфорной и других кислот, органических продуктов, солей редких металлов. Высококремнистый чугун можно применять только в качестве отливок, так как механической обработке он поддается с большим трудом.

Чугунные теплообменные аппараты выполняются в виде отливок, представляющих собой цилиндрические или полусферические сосуды с крышками различной формы. Разъем между отдельными частями корпуса выполняется в виде фланцевых соединений, обрабатываемых механически по уплотняющим поверхностям (рис. 1-2).

Наружные теплопередающие поверхности чугунных аппаратов выполняют в виде паровых рубашек или плотно прилегающих к стенке змеевиков, а внутреннее — в виде змеевиков внутри кожуха.

Из чугуна изготавливают обычно реакторы — аппараты, в которых продукт подвергается химической обработке, сопровождающейся выделением или потреблением тепла. При работе с нелетучими и нетоксичными веществами реакторы иногда выполняют без крышек. Если процесс протекает в реакторе под давлением, аппарат называется автоклавом.

Элементы теплообменных аппаратов в виде змеевиков, спиральных секций или трубчаток с трубами, отдельно закрепляемыми в трубной доске, не выполняют из чугуна вследствие трудности изготовления таких конструкций методом отливки, а также из-за высокой хрупкости чугуна.

Монтаж аппаратов из чугуна, особенно высококремнистого, производят тщательно и осторожно. Изделия из высококремнистого чугуна нельзя бросать, ударять по ним при сборке металлическим молотком, нажимать для

подгонки ломом, нагружать весом других деталей, перетягивать при сборке крепящие их болты. Высококремнистый чугун дает трещины при быстром нагреве и при быстром охлаждении.

Чугунные аппараты, не выдерживающие перекосов и прогибов, устанавливают на прочных бетонных фундаментах.

Повышение производительности труда в технологических процессах требует наряду с механизацией и автоматизацией увеличения параметров процессов (температуры и давления) и увеличения емкости аппаратов, в которых протекает процесс. Поэтому в последнее время стальные аппараты начали вытеснять чугунные аппараты, которые могут быть выполнены только для сравнительно низких давлений и ограниченных размеров.

При прогрессивной технологии аппаратостроения, основанной на использовании фасонных и специальных профилей стального проката, а также на сборке деталей и узлов методом автоматической электросварки, нельзя широко использовать чугунное литье. Поэтому дальнейшее изложение особенностей технологии изготовления и монтажа теплообменной аппаратуры относится главным образом к стальной аппаратуре.

4-3. СТАЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Основным материалом для изготовления теплообменной аппаратуры служит прокатная сталь различных марок.

Стальные теплообменные аппараты нашли широкое применение в энергетической, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, легкой и других отраслях промышленности. Многие аппараты массового применения (теплофикационные подогреватели, конденсаторы, испарители, выпарные аппараты, ректификационные колонны некоторых типов и др.) изготавливаются специализированными заводами и цехами в больших количествах.

Разработка технологического процесса

Аппарат изготавливается на основе технологического процесса, степень совершенства которого определяет

качество, трудоемкость и сроки изготовления изделия, а также потребность в механосборочном и специальном оборудовании и квалифицированной рабочей силе. Технологический процесс обычно выбирают после сравнения нескольких вариантов.

В технологическом процессе предусматривается порядок производства отдельных деталей и порядок сборки изделия.

При разработке технологического процесса руководствуются следующими положениями, способствующими повышению производительности труда, улучшению качества и сокращению сроков монтажа теплообменной аппаратуры:

1. Число узлов должно быть минимальным, что уменьшает число монтажных стыков и способствует лучшему использованию грузоподъемности монтажных кранов.

2. Степень готовности деталей и узлов должна быть такой, чтобы после их установки и закрепления они сохраняли полную устойчивость до установки последующих деталей и узлов.

3. Крепление деталей и узлов на ранее установленных элементах или на фундаменте должно производиться по возможности в стык и обеспечивать простоту и надежность монтажа.

В первой части разработки технологического процесса содержатся подробные сведения о качестве и порядке изготовления аппарата в соответствии с техническими условиями: класс аппарата, марки материалов по ГОСТ, способы заготовительных операций, условия сварки, требования к сварным швам, режимы термической обработки, методы межоперационного и окончательного контроля, условия испытания готового изделия.

Вторая часть разработки технологического процесса посвящается выбору рациональных операций обработки деталей, последовательности рабочих операций, а также выбору наиболее рациональных оборудования, инструмента и приспособлений.

В третьей части разработки определяется квалификация рабочих для различных операций технологического процесса, трудоемкость работ по каждой операции и по всему процессу из-

готовления изделия, продолжительность каждой операции, количество расходуемых вспомогательных материалов, размер необходимой производственной площади и место монтажа.

Разработанный технологический процесс изготовления деталей и сборки аппарата вносится в технологические карты и инструкции.

Заготовка деталей

Заготовки деталей выполняют обычно из сортового и листового проката, труб, штамповок, поковок и отливок. Листовой прокат используется для заготовки кожухов, плоских днищ и крышек, трубных досок, фланцев, перегородок, тарелок, лап и различных штампованных изделий (выпуклые крышки и днища, колпачки и т. п.). Из сортового проката изготавливают заготовки каркасов трубочек, анкерных связей, крупных фланцев, бобышек, поковок и штамповок. Из труб выполняют штуцера, поверхности нагрева, барботеры и другие узлы и детали.

Выполненные в заготовительных цехах заготовки поступают в кузнечно-прессовые, сварочные и механические цехи, где последовательно проходят все необходимые операции, после чего поступают в отделение или цех сборки.

Изготовление цилиндрического кожуха теплообменного аппарата

В современном аппаратостроении сварка служит важнейшим технологическим процессом, обеспечивающим при жестком соединении стальных элементов высокую прочность и плотность шва, высокую производительность труда и значительную экономию металла.

При изготовлении сосудов и аппаратов допускается применение промышленных методов сварки, обеспечивающих качество сварных соединений в соответствии с требованиями Госгортехнадзора. Изготовление сосудов путем сварки может производиться только при наличии на предприятиях и монтажных площадках необходимых средств для производства сварки и контроля качества сварных соединений в соответствии с требованиями Правил Госгортехнадзора.

Разрешение на изготовление сварных сосудов выдается местными органами Госгортехнадзора на основе проведенного обследования, оформляемого актом, составляемым в двух экземплярах, из которых один хранится на заводе-изготовителе, а другой — в местном органе Инспекции Госгортехнадзора. При отсутствии на месте монтажа необходимых средств для производства сварки и контроля ее качества допускается выдача разрешений на производство сосудов с ограничениями, которые должны быть отмечены в акте.

Сварочные работы при изготовлении сосудов должны производиться, как правило, в помещениях с температурой не ниже нуля. В отдельных случаях допускается проведение работ по сварке сосудов при температурах окружающего воздуха ниже нуля, при выполнении их в соответствии с Правилами Госгортехнадзора для изготовления сосудов. При дожде, ветре и снегопаде сварочные работы могут производиться только при надлежащей защите мест сварки от непосредственного воздействия дождя, ветра и снега.

Стальные элементы теплообменных аппаратов сваривают, как правило, методом дуговой сварки (ручной, полуавтоматической, автоматической под флюсом, аргонодуговой) или методом контактной сварки (точечной, роликовой, стыковой). Газовая сварка применяется в исключительных случаях: для тонких стальных листов (≤ 2 мм) и стальных труб малого диаметра (до 32 мм), а также при изготовлении изделий из цветных металлов. При этом сварные соединения не должны соприкасаться с химически активными средами и подвергаться воздействию высоких вибрационных и ударных нагрузок при повышенных температурах.

Цилиндрическая часть кожуха может быть выполнена в виде обечайки диаметром до 800 мм из одного свернутого в цилиндр листа, обечайки диаметром до 1600 мм из двух согнутых в полуцилиндры листов и нескольких обечаек при большой длине кожуха.

Листовой металл, предназначенный для изготовления кожухов, подвергают предварительной обработке, заклю-

Допускаемая высота прогиба или волнистости листов, мм

Толщина листа, мм	Ширина листа, мм						
	До 1 200	1 200—1 500	1 500—1 800	1 800—2 100	2 100—2 700	2 700—3 000	2 700—3 000
6—10	16	20	24	28	32	36	—
10—12	12	14	16	20	24	28	32
12—20	12	14	16	18	22	25	28
20—25	12	14	16	18	20	22	24
25—50	12	14	14	14	16	18	20
50—100	6	8	10	11	12	14	16

чающейся в правке и разделительной резке листов, что облегчает транспортировку и последующие операции их обработки.

Правка. Листовую сталь, предназначенную для изготовления кожухов и других деталей сосудов, перед разметкой и резкой проверяют на волнистость и прогиб. Если искривления не превышают норм, указанных в табл. 4-2, листы направляют на разметку и резку.

Волнистость и прогиб листа устраняют на листоправильных вальцах, представляющих собой машину из двух рядов валков, с общим числом их от 5 до 11, установленных в шахматном порядке. На рис. 4-1 представлена схема девятивалковой листоправильной машины. Перед вальцами и за ними устанавливают роликовые столы. Силой трения между нижним крайним валком и листом последний втягивается в машину и проходит между верхним и нижним рядами валков, изгибаясь попеременно вверх и вниз. Пластический изгиб в разных направлениях делает лист плоским. Для полного выправления листы пропускают через правильные вальцы несколько раз в обоих направлениях. Два крайних верхних валка машины, служащих направляющими, устанавливают несколько выше основных валков и

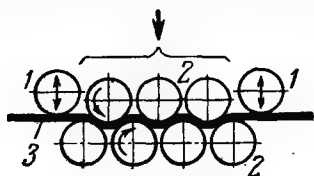


Рис. 4-1. Схема девятивалковой листоправильной машины.

1—рабочие направляющие валки; 2—рабочие изгибающие валки; 3—лист.

регулируются самостоятельно. В зависимости от габаритов машины, мощности двигателей, толщины листов, диаметра и шага валков листы проходят между валками со скоростью от 3 до 10 м/мин. Диаметр валков составляет 0,9—0,95 от величины их шага, равного 200—400 мм.

Тонкие листы могут быть выправлены на плите деревянными молотками.

Заготовки для обечаек, предназначенные для изгиба на листогибочных вальцах, предварительной правке на листоправильных машинах не подвергают.

Разделительная резка листов. Для облегчения операций обработки листовых заготовок листы больших габаритов предварительно размечают метром или рулеткой и разрезают на более мелкие листы с помощью огневой резки.

Для резки углеродистой стали более всего распространена газокислородная (газовая) резка. Для резки листов из высоколегированных хромоникелевых и хромистых сталей такой способ непригоден, так как образующиеся на кромках листа тугоплавкие окислы хрома препятствуют процессу резки. Хорошее качество и достаточно высокую производительность обеспечивает метод кислородно-флюсовой резки высоколегированных сталей. При этом методе к месту реза подводится специальный флюс, разжижающий окислы хрома, что позволяет им вытекать из прорези.

Для резки листов применяют также автоматическую электродуговую резку. При этом способе разрез получается с меньшей чистотой кромки. При дуговой резке получается более

глубокая зона термического влияния с неблагоприятно измененной структурой металла. Если из-за отсутствия других возможностей дуговая резка неизбежна, рекомендуется удалять с кромок разреза металл на глубину не менее 5—7 мм.

Разметка. Одна из ответственных операций при изготовлении обечайки кожуха — разметка. Точность разметки должна быть высокой.

Под разметку отбирают листы, соответствующие толщине стенки аппарата. Габаритные размеры листа должны быть такими, чтобы после разметки развертки цилиндра с необходимыми припусками на обработку отходы металла были минимальными. Коэффициент использования раскраиваемого листа должен составлять около 90%.

Разметка производится двумя методами: расчетным и графическим (плазовым). При расчетной разметке установленные расчетным путем размеры детали наносят на разметочный эскиз, составленный по рабочим чертежам аппарата. При графической разметке деталь вычерчивают на площадке (плазе) в натуральную величину и размеры определяют графическим путем. В некоторых случаях размер наносится по обработанной детали как по шаблону. Такая операция носит название наметки и находит применение в тех случаях, когда изготавливается несколько одинаковых деталей.

Длину развернутой обечайки определяют по нейтральному слою толщины листа, так как при изгибании металла наружные волокна удлиняются, а внутренние укорачиваются. Например, для сварной цилиндрической обечайки с наружным диаметром $D_n = 1000$ мм и толщиной стенки $S = 16$ мм необходимая длина листа L составит:

$$L = \pi(D_n - S) = 3,14(1000 - 16) = 3091,6 \text{ мм.}$$

По длине обечайки листы после обрезки должны иметь отклонения, не выходящие за пределы допуска ± 5 мм.

Для обмера листов и откладывания на них размеров применяют стальные метры, линейки и рулетки. Размеры, наносимые на металл, должны отсчитываться по масштабной линейке;

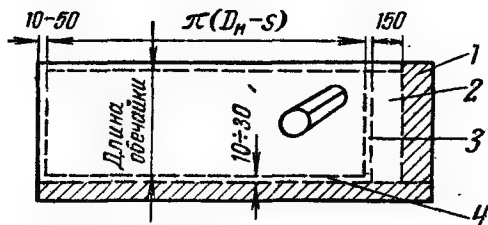


Рис. 4-2. Раскройная карта обечайки.

- 1—отходы листа; 2—припуск для изготовления образцов для испытаний металла; 3—припуск по продольному шву обечайки (в зависимости от толщины листа); 4—припуск по кольцевой кромке (в зависимости от толщины листа).

ке; применение угольников не допускается, перпендикулярные линии можно наносить только путем геометрических построений. Разметка производится на ровном металлическом или деревянном стеллаже шириной не более 2 м и длиной не менее 5 м.

Разметку обечайки по раскройной карте выполняют в следующем порядке: на листе с двумя обрезанными взаимно-перпендикулярными кромками вдоль продольной кромки отмеряют установленный раскройной картой припуск на обработку первой кромки по окружности обечайки (рис. 4-2). От линии припуска по ширине листа откладывают размер длины обечайки, после чего отмеряют припуск на обработку второй кромки по окружности обечайки. От обрезанной поперечной стороны листа отмеряют с обоих концов припуски на обработку продольных кромок обечайки по образующим цилиндра, между которыми откладывают размер длины окружности по нейтральному слою. Затем на листе отмеряют полосу, из которой будут вырезаны пластины для испытания сварных швов. Линии отреза на листе намечаются керном. Нанесение других разметочных контуров на металл при помощи керна не допускается. Размеченные детали маркируют краской.

Для получения качественных сварных соединений цилиндрическую часть кожуха аппарата иногда изготавливают по диаметру готовой крышки или днища, измеренному в холодном состоянии.

Резка. После разметки листа производят его резку. При изготовлении теплообменной аппаратуры применяют два способа резки: механический и огневой.

Механическую прямолинейную и криволинейную резку листов толщиной до 8 мм обычно производят роликовыми ножницами с двумя дисковыми ножами. Прямолинейная резка листов большей толщины производится на гильотинных ножницах или пресс-ножницах.

Качественная резка ножницами достигается только в том случае, когда процессе близок к чистому сдвигу. Тупой инструмент вызывает наклеп металла, поэтому режущие кромки ножей должны быть хорошо заточены. Задний угол ножа γ должен быть не более 2° (рис. 4-3), а угол резания ножа $\alpha = 70-75^\circ$. Зазор между лезвиями ножей S устанавливается от 0,025 мм при толщине в 1 мм до 0,5 мм при толщине более 15 мм. При большем зазоре наблюдается протягивание металла через щель между ножами, способствующее образованию нечистого разреза с крупными упрочненными заусенцами. При других операциях — вальцовке, бортовке, сварке — упрочненные заусенцы могут служить началом образования трещин в металле. Для удаления поврежденной при разрезке зоны с кромок листа желательно снимать слой металла глубиной 2—4 мм.

Огневая резка, широко применяемая в изготовлении теплообменных аппаратов, может осуществляться вручную, полуавтоматически и автоматически. Ручная газовая резка при серийном и массовом производстве почти полностью вытеснена полуавтоматами и газорезательными машинами-автоматами. В процессе резки на таких машинах лист неподвижен, а ре-

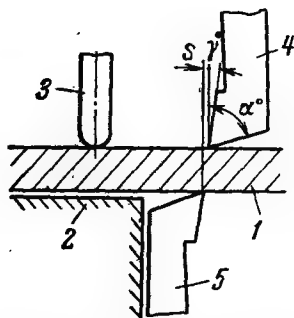


Рис. 4-3. Схема установки ножей при механической резке листов.

1 — лист; 2 — стол ножниц; 3 — прижим; 4 — верхний (подвижный) нож; 5 — нижний (неподвижный) нож.

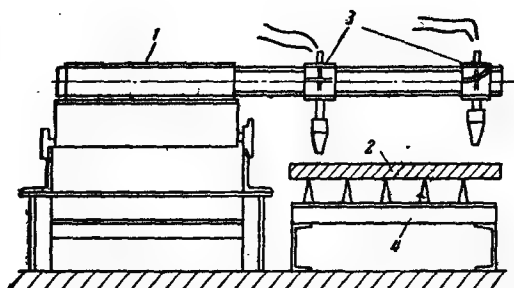


Рис. 4-4. Схема газорезательной машины.

1 — каретка автомата; 2 — лист; 3 — резаки; 4 — стол.

зак или блок резаков, укрепленный на каретке станка с помощью специальной штанги, передвигается вдоль линии разреза (рис. 4-4). При установке на штанге нескольких резаков (в случае необходимости — под углом к плоскости листа) возможны одновременный раскрой металла для нескольких деталей и обработка скошенных кромок под сварку (рис. 4-5).

Кромки листов толщиной до 3 мм обрабатывают под сварку без скосов. При толщине листов от 3 до 13 мм делают односторонний скос, а при больших толщинах — двусторонний.

Резка сортовой стали (круг, квадрат, полосы, прутки, фасонные профили) и труб производится механически (на пресс-ножницах, приводными дисковыми пилами с зубьями, приводными ножовками) или газовыми резаками.

Обработка кромок под сварку. Как продольные, так и кольцевые кромки обечаек, предназначенные для наложения сварного шва, об-

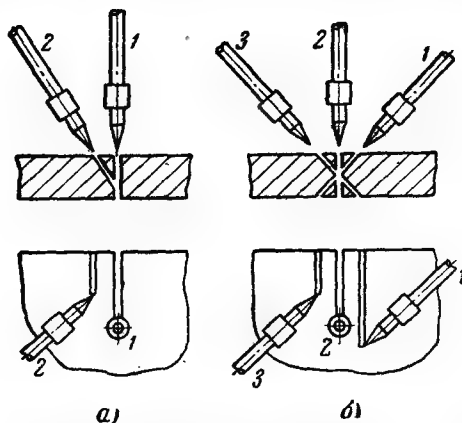


Рис. 4-5. Схема одновременной резки и обработки кромок блоками резаков.

а — двойным блоком; б — тройным блоком; 1, 2, 3 — резаки.

работывают для удаления повреждений, возникших в процессе резки листа.

Обработка кромок производится механически или огневым способом. Механическая обработка выполняется на станках различных конструкций: продольнострогальных, кромко-строгальных, кромкообточных, фрезерных. Небольшую обработку можно производить ручным инструментом — пневматическими зубилами, шлифовальными машинками.

Обработка кромок листов толщиной до 16 мм строганием производится после резки ножницами на глубину 2—3 мм, а после огневой резки на 4 мм. Кромки более толстых листов обрабатываются на 1 мм глубже. Огневая обработка кромок производится только автоматической или полуавтоматической газовой резкой и обычно совмещается с резкой листа.

Изгибание листов для обечаек. Листы, предназначенные для изгибания, не должны иметь расслоений, трещин, плен и неметаллических включений.

При изгибании обечаек для барабанов котлов и кожухов теплообменных аппаратов разница в размерах наружной и внутренней окружностей цилиндра допускается не более 5% внутренней окружности. Листы толщиной более $\frac{1}{40}$ внутреннего диаметра обечайки изгибают на вальцах только в горячем состоянии, а после холодной гибки подвергают отжигу для снятия наклепа.

Перед изгибанием листов в цилиндр, корыто или конус необходимо произвести специальную операцию — подводку кромок. При вальцовке листов в цилиндр или конус края их на длине 100—150 мм остаются прямыми, и при стыковке таких концов поверхность сосуда имеет острый излом в месте образования шва (рис. 4-6,а). В зависимости от толщины металла подводку кромок выполняют на кромкогибочных прессах (рис. 4-6,б), на гибочных вальцах (рис. 4-6,в) или вручную. Подводка кромок на листах толщиной более 6 мм может быть выполнена на листогибочных вальцах при помощи подкладных листов, изогнутых по соответствующему радиусу (рис. 4-6,г). Подводка кромок листов

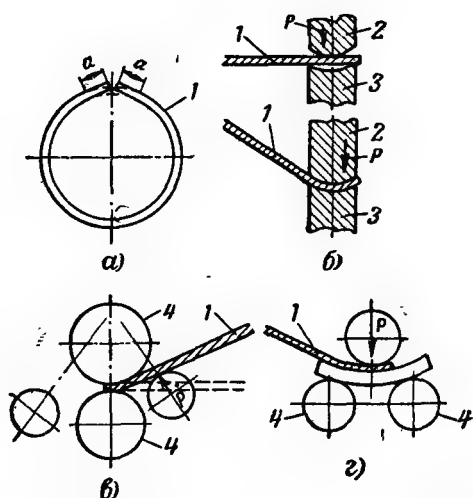


Рис. 4-6. Подводка кромок листа перед изгибанием.

а — заготовка обечайки без подводки кромок; б — подводка кромок на кромкогибочном прессе; в — подводка кромок на гибочных вальцах; г — подводка кромок на листогибочных вальцах с подкладным листом; 1 — лист; 2 — подвижный пуансон; 3 — неподвижная матрица; 4 — неподвижные валки; P — действующая сила.

производится на длине a , равной половине расстояния между осями двух нижних валков листогибочной машины.

После подводки кромок листы поступают на вальцевание для придания им требуемой конфигурации. Вальцевание производится на трех- или четырехвалковых горизонтальных вальцах (рис. 4-7). Перемещение листа в трехвалковых вальцах (рис. 4-7,б) в направлении вращения нижних ведущих валков происходит в результате трения листа о валок, вызванного упругостью листа. Верхний валок вращается под действием тангенциальной силы от листа. В четырехвалковых вальцах (рис. 4-7,в) лист перемещается под действием вращения сжимающих его больших валков — верхнего и нижнего. Изгибается лист действием малых боковых нажимных валков.

Вальцовка обечайки осуществляется в несколько возвратных проходов листа в валках до соприкосновения ее кромок.

При вальцовке обечаек возможны следующие дефекты: перекося кромок, перегиб на радиус меньше заданного, конусность, овальность, бочкообразность. Во избежание брака при вальцовке следует стремиться к поддержанию в исправном состоянии вальцев и

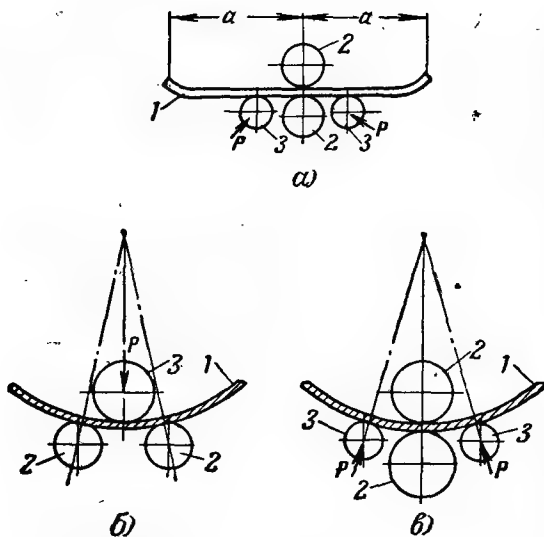


Рис. 4-7. Схемы гибки листов на листогибочных вальцах.

а — положение листа в четырехвалковых вальцах перед гибкой; б — гибка в трехвалковых вальцах; в — гибка в четырехвалковых вальцах; 1 — лист; 2 — неподвижные валки; 3 — подвижные валки; Р — изгибающая сила.

высокой точности размеров листа-заготовки; необходима также высокая квалификация вальцовщиков.

Материалы, применяемые для сварки теплообменных аппаратов. Сварку обечаек теплообменных аппаратов производят методами автоматической сварки под флюсом, ручной электродуговой сварки, а при большой толщине электрошлаковой сварки. Применяют также и газовую сварку, главным образом на монтаже. Для сварки труб применяют контактную сварку, ручную электродуговую и газовую.

При автоматической сварке под флюсом в качестве присадочного материала применяют необмазанную сварочную проволоку в катушках. Шлаковый покров, образующийся из расплавленных флюса и окислов, предохраняет сварочную ванну от воздействия кислорода и азота воздуха. Многие флюсы способны передавать некоторые входящие в их состав элементы в ванне расплавленного металла. Поэтому легирование металла шва можно осуществлять как применением присадочной проволоки из легированной стали, так и переводом в металл шва примесей, входящих в состав флюса.

При автоматической сварке только 30—40% металла шва образуется за счет присадочной проволоки. Остальная часть представляет собой оплавленный металл свариваемых кромок.

Сварку малоуглеродистых нелегированных сталей производят сварочной проволокой марок Св08, Св08А, Св08ГА, Св10ГА и Св1072. Для сварки молибденовых, хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых сталей применяют проволоку марок Св10ХМ, Св10МХ, Св10Х5М, Св08ХМФ и Св08ХМФБ, а для свар-

ки высоколегированных сталей аустенитного класса — проволоку марок Св02Х18Н9, Св04Х19Н9, Св06Х19Н9Т и Св08Х19Н10Б. Нержавеющие стали ферритного класса сваривают проволоками марок Св06Х14, Св10Х13, СвХ17Т и Цв13Х25Т. Кроме указанных марок, применяют иногда и другие.

Сварочная проволока поставляется по ГОСТ 2246-60. Первые две буквы в марке проволоки обозначают, что проволока предназначена для сварки. Далее идут цифры, показывающие содержание углерода в сотых долях процента, буквы, указывающие, какие легирующие элементы входят в состав проволоки, и цифры, обозначающие содержание легирующих элементов в целых процентах. Маркировка проволоки аналогична маркировке легированных сталей.

Сварочная проволока поставляется диаметром от 0,3 до 12 мм. Наибольшее применение находит сварочная проволока диаметром 1—8 мм.

Проволока поставляется свернутой в мотки весом от 1,5 до 40 кг. По требованию потребителя проволока диаметром до 5 мм должна поставляться в катушках для непосредственного использования в сварочных автоматах и полуавтоматах.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без окалина, ржавчины и масла. Проволока из высоколегированной стали должна поставляться в травленом и отбеленном состоянии.

Наиболее распространенные флюсы при автоматической сварке теплообменных аппаратов — АН-348А и ОСЦ-45.

При ручной электродуговой сварке труб и листов применяют электроды марок Э42 и Э42А по ГОСТ 9467-60. Цифры в марке электрода указывают минимальный допустимый предел прочности при испытании на растяжение. Буква А в конце марки показывает, что в наплавленном металле электродов содержится пониженное количество вредных примесей — серы и фосфора, а пластичность его выше, чем у наплавленного металла аналогичных электродов, не имеющих буквы А в конце марки.

Для сварки низко- и среднелегированных сталей применяют электроды типов Э-М, Э-МХ, Э-ХМ, Э-ХМФБ, Э-ХМФ, Э-Х2МФБ и Э-Х5МФ. Буквы в обозначении типа электродов указывают, какие легирующие примеси имеются в наплавленном металле этих электродов, а цифры, стоящие за буквами, — ориентировочное содержание этих элементов. Электроды отличаются также по способу легирования (через стержневую проволоку или через обмазку) и компонентам обмазки. Например, для сварки стали 12Х1МФ применяют электроды типа Э-ХМФ марки ЦЛ27. Цифра обозначает порядковый номер марки, которому соответствуют определенный химический состав и механические свойства наплавленного металла. Электроды типа Э-ХМФ марки ЦЛ27 диаметром 5 мм с руднокислым покрытием имеют следующее условное обозначение: ЦЛ20—Э-ХМФ—5,0-Р ГОСТ 9467-60.

Каждая партия электродов, проволоки или флюса должна иметь сертификат с указанием завода-изготовителя, марки и химического состава.

Размеры электродов для дуговой электрической сварки и общие технические требования к ним установлены ГОСТ 9466-60. На заводе, изготовляющем теплообменные аппараты, проверяют технологические свойства электродов. Для этого сваривают втавр две стальные пластинки на длине 100 мм и наблюдают за процессом плавления электрода, качеством сварного шва и его изломом.

При испытании дуга должна легко зажигаться, гореть равномерно, без чрезмерного разбрызгивания металла. Металл шва должен равномерно покрываться шлаком, легко удаляемым после охлаждения. Металл шва не должен иметь пор, трещин и шлаковых включений. Поверхность шва должна быть гладкой, без пор.

Проверка технологических свойств электродов поручается опытному сварщику, прошедшему испытания согласно «Правилам испытания электросварщиков и газосварщиков» (Госгортехнадзор СССР, 1960) и имеющему соответствующее удостоверение.

Для проверки прочности обмазки из партии отбирают не менее трех электродов. Партией считают электроды одной марки и одного диаметра, с покрытием из компонентов одной поставки и одного состава при одинаковом технологическом процессе изготовления электродов. Партия электродов, предназначенная для сварки легированных сталей, должна быть изготовлена из проволоки одной плавки.

Прочность покрытия (обмазки) электродов проверяют, бросая электрод плашмя на гладкую стальную плиту. Покрытие электродов диаметром не более 3 мм не должно разрушаться при падении с высоты 0,5 м, а диаметром 3 мм и менее — с высоты 1 м.

Покрытие электродов должно быть прочным, плотным, без пор, трещин, вздутий и комков. Между весом покрытия и весом стержня должно быть выдержано соотношение, указанное в паспорте на электроды. Покрытие электродов должно располагаться относительно стержня концентрично.

После пребывания в воде с температурой 15—25°С в течение 24 ч покрытие не должно иметь признаков разрушения. Электроды должны транспортироваться и храниться в условиях, исключающих возможность их увлажнения и повреждения.

Один из концов электрода должен быть свободным от обмазки на длине 30 мм так же, как и торец противоположного конца, для того, чтобы обеспечить электрический контакт

между стержнем электрода и электрододержателем, а также между стержнем и свариваемой деталью.

Механические свойства металла шва определяют только при испытании электродов диаметром более 3 мм. При испытании электродов диаметром 3 мм и менее испытывают только сварное соединение — на растяжение и изгиб.

Для испытания механических свойств металла шва и сварного соединения сваривают в стык пластины толщиной 12—14 мм, из которых изготовляют образцы. Сварку пластин производят по режиму, рекомендованному в паспорте на электроды. Температура в помещении должна быть не менее +5°С.

Согласно ГОСТ 9467-60 металл шва должен содержать при сварке углеродистых и низколегированных сталей не более 0,04—0,05% серы и фосфора (каждого элемента в зависимости от марки электрода). При сварке высококачественных сталей содержание серы и фосфора в металле шва не должно быть более 0,035% каждого элемента. Металл шва, наплавленный электродами для сварки легированных сталей, должен проходить химический контроль на содержание основных легирующих элементов, которое должно находиться в пределах, установленных для электродов данной марки и указанных в паспорте.

Сборка и сварка продольных стыков. Сборка продольных стыков после вальцовки листов осуществляется на специальных сборочных стендах. Сборка цилиндрической части обечайки или корыт заключается в совмещении продольных кромок в соответствии с техническими требованиями к стыкам под сварку и прихватке этих кромок посредством дуговой электросварки в нескольких местах (с длиной шва в 10—40 мм через каждые 200—400 мм).

Обычно при сборке применяют натяжные (рис. 4-8) и кантовальные устройства (рис. 4-9). В зависимости от толщины стенки величина зазора между кромками должна быть выдержана

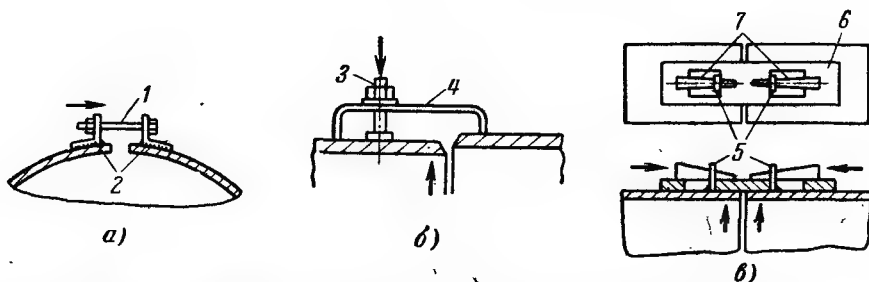


Рис. 4-8. Натяжные приспособления для сборки обечайки под сварку.

а — приваренные уголки со стяжным болтом; б — приваренный болт с натяжной гайкой; в — приваренные уши
с натяжными клиньями и плитой.

1 — стяжной болт; 2 — уголки; 3 — болт; 4 — натяжная скоба; 5 — уши; 6 — плита; 7 — натяжные клинья.

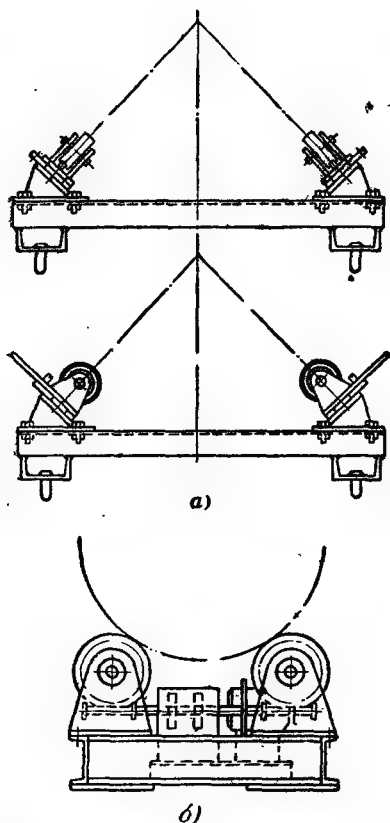


Рис. 4-9. Роликовые кантователи для сборки и сварки цилиндрических обечаек.

a — универсальный ручной кантователь для продольного перемещения обечайки (верхний) и для вращения обечайки (нижний); *б* — кантователь с электрическим приводом к роликам.

жана при сборке в пределах, указанных в табл. 4-3.

Смещение продольных кромок листов одинаковой толщины не должно превышать 10% от толщины стенки, но не более 3 мм. Допускаемая конусность обечайки приведена в табл. 4-4. Эллиптичность подготовленной к сварке обечайки в любом поперечном сечении не должна превышать 1% номинального диаметра.

Для придания обечайке цилиндрической формы в некоторых случаях после сварки ее подвергают калибровке путем обкатки в листогибочных вальцах. В зависимости от материала и толщины стенки обечаек калибровка производится в холодном или горячем состоянии (при температуре около 650° С).

После точной установки кромок и прихватки ручной электродуговой сваркой заготовка подается на сварку.

На машиностроительных заводах получила широкое распространение автоматическая электродуговая сварка под флюсом. Для автоматической сварки применяют сварочные тракторы типов УТ-2000, УТ-1500 (ЦНИИТМАШ) и ТС-11, ТС-12, ТС-17 (Институт электросварки АН УССР имени Е. О. Патона). Подварка осуществляется автоматически этими же машинами. Объем ручной электродуговой сварки непрерывно сокращается.

В зависимости от диаметра обечайки и толщины ее стенки автоматическая сварочная установка может производить сварку под флюсом проволокой диаметром до 10 мм при скорости сварки от 5 до 50 м/ч. Расход флюса составляет 85—100% от расхода электродной проволоки.

При изготовлении толстостенных обечаек применяют многослойную сварку. При этом просматривают каждый слой шва, вырезают и проваривают все места непровара, после чего наваривают следующий слой.

Сборка и сварка кольцевых стыков. В кожухах аппаратов, цилиндрическая часть которых состоит из нескольких обечаек, кольцевые стыки образуются как при сборке обечаек между собой, так и при сборке цилиндрической части с крышками и днищами. Сборка под сварку кольцевых стыков во многом аналогична сборке продольных стыков.

Некоторые конструктивные требования Госгортехнадзора к сварным теплообменникам. При сборке теплообменников продольные и поперечные швы должны быть только стыковыми. Приварка днищ к цилиндрической части внахлестку допускается в особых случаях при толщине стенки отбортованной части менее 20 мм и только после получения разрешения местных органов инспекции Госгортехнадзора.

При проектировании сварных стыков между элементами разной толщины необходимо предусматривать плавный переход от одного элемента к другому путем постепенного утонения более толстого элемента на длине, равной не менее четырехкратной разности в толщине стыкуемых элементов. При разнице в толщине соединяемых элементов не более 5 мм и толщине ли-

Зависимость величины зазора от толщины листа металла

Толщина листа, мм	Вид соединения				
					
	зазор a , мм	зазор a , мм	притупление b , мм	зазор a , мм	притупление b , мм
1,5	1,5	—	—	—	—
2	2	—	—	—	—
2,5	2	—	—	—	—
3	—	1,5	1	—	—
3,5	—	1,5	1	—	—
4	—	2	1	—	—
4,5	—	2	1	—	—
5	—	2	1,5	—	—
6	—	2	1,5	—	—
7	—	2,5	1,5	—	—
8	—	3	1,5	2	1,5
10	—	—	—	2	1,5
12	—	—	—	2	1,5
14	—	—	—	2	1,5
16	—	—	—	3	2
18	—	—	—	3	2
20	—	—	—	3	2
22	—	—	—	3	2
24	—	—	—	3	2
28	—	—	—	3	2
30	—	—	—	3	2
35	—	—	—	3	2

ста не менее 10 мм допускаются стыковые швы без предварительного утонения толстой стенки, причем конфигурация швов должна обеспечивать плавный переход от толстого листа к тонкому. При сварке элементов, скрепленных анкерными связями, допускается соединение двух элементов при разнице в толщине, не превосходящей 50% толщины тонкого элемента, без предварительного утонения более толстого.

Расположение продольных сварных швов в горизонтальных аппаратах должно быть вне пределов 140° дуги

нижней части корпуса аппарата, если нижняя часть малодоступна для осмотра.

Кольцевые (поперечные) сварные швы в горизонтальных сосудах следует располагать вне опор сосуда. В случае приварки опор к корпусу или днищу сосуда расстояние между краем кольцевого шва сосуда и краем шва приварки опоры должно быть не меньше толщины стенки сосуда.

Штуцера и люки не разрешается устанавливать на продольных швах корпуса сосуда. Установка штуцеров и люков на кольцевых швах разрешается лишь в случаях, когда установка штуцеров и люков на целом листе невозможна и при условии укрепления отверстий. Кольца, укрепляющие отверстия, должны плотно прилегать к поверхности сосуда и быть снабжены сигнальными отверстиями с резьбой М10. Швы колец испытывают сжатым воздухом, подводимым через сигнальные отверстия. Сигнальные отверстия колец при гидравлическом испытании и в дальнейшем остаются от-

Таблица 4-4

Допускаемые отклонения на конусность обечайки

Диаметр обечайки, мм	Конусность, мм
250—650	1
650—1 000	1,5
1 000—1 500	2
1 500—2 500	2,5
Более 2 500	3

крытыми. Особое внимание обращают на качество внутреннего шва, соединяющего стенку сосуда и трубу штуцера.

При сварке двух обечаек стыковым швом смещение продольных швов в соседних обечайках должно быть не менее 200 мм; при этом отклонение в размере смещения допускается в пределах ± 5 мм.

Смещение кромок обечаек в радиальном направлении для листов толщиной до 6,5 мм не должно превышать 1,5 мм, а для листов толщиной от 7 до 25 мм — 20% толщины листа и быть не более 5 мм при любой толщине листа.

Перекас продольных осей стыкуемых обечаек допускается не более 2 мм на 1 м.

Следует иметь в виду, что кольцевое стыкование значительно сложнее продольного, так как практически всегда имеют место некоторое различие диаметров обечаек и некоторая их овальность. При массовом производстве аппаратов кольцевое стыкование обечаек между собой и днищами осуществляется с применением центрирующих приспособлений.

Вырезка отверстий. Для установки на аппарате штуцеров, бобышек и гильз, а также для заведения труб на готовых, сваренных кожухах вырезают отверстия по разметке, выполненной на развертке кожуха.

Отверстия небольшого диаметра сверлят на полный диаметр сверлом или фрезой. Отверстия больших диаметров рассверливают с предварительной центровкой сверлом малого диаметра (14—16 мм) на глубину 10—12 мм.

При невозможности вырезки отверстий сверлами и фрезами применяют оправку с закрепленными в ней двумя резцами, установленными на расстоянии диаметра отверстия один от другого. Большие отверстия в листах вырезают путем сверления отверстий диаметром 10—12 мм по размеченному контуру с последующей вырубкой перемычек между отверстиями пневматическим зубилом и окончательной зачисткой кромок абразивным кругом.

После сверления и обработки отверстия в кожухе очищают от заусенцев с наружной и внутренней стороны

при помощи пневматических шлифовально-зачистных инструментов. Особенно тщательно выполняют отверстия под развальцовку труб.

Контроль качества сварных соединений теплообменных аппаратов

К сварке сосудов, работающих под давлением, допускаются сварщики, имеющие удостоверение, выданное квалификационной комиссией после испытания сварщика в соответствии с Правилами Госгортехнадзора.

Сварной шов должен иметь клеймо сварщика.

Согласно Правилам Госгортехнадзора сварные швы сосудов, работающих под давлением, подвергаются внешнему осмотру, механическим испытаниям на контрольных образцах, вырезанных из соединений, просвечиванию гамма-лучами, исследованию макро- и микроструктуры, гидравлическому испытанию. Результаты испытаний заносятся в паспорт сосуда.

Внешнему осмотру подвергают все сварные швы. При внешнем осмотре обращают внимание на трещины в шве или в околошовной зоне, которые могут появиться из-за неравномерной усадки металла шва, а также вследствие образования мартенсита, имеющего несколько больший удельный объем, чем другие структурные составляющие стали. Закалившиеся на мартенсит объемы металла стремятся расширяться, поэтому вокруг мартенситных участков шва и в самих участках возникают большие внутренние напряжения. Мартенсит очень хрупок, что создает благоприятные условия для образования трещин.

В Правилах Госгортехнадзора указывается минимальная температура окружающего воздуха, при которой можно производить сварку. Эта температура различна в зависимости от толщины свариваемых деталей и химического состава сталей.

Чтобы избежать подкалки шва и трещинообразования, все сварочные работы при изготовлении теплообменных аппаратов должны производиться, как правило, при температуре не ниже 0° С. В случае проведения сварки при температурах ниже нуля следует стремиться к максимально возможному уменьшению числа прихваток, уменьшению объема наплавленного металла и выполнению многослойных швов без перерывов.

Чтобы избежать образования трещин, металл больших толщин сваривают с предварительным и сопутствующим подогревом. При толщине стенки сосуда менее 16 мм малоуглеродистую легированную сталь с содержанием углерода до 0,2% сваривают без предварительного подогрева. При толщине стенки более 16 мм необходим предварительный и сопутствующий подогрев до 100—200° С.

Сварные швы углеродистой стали при толщине свариваемых листов более 35 мм обрабатывают термически.

В сварном шве не должно быть наплывов и подрезов, а также отступлений от формы и размеров. Не допускается пористой, озодреватой поверхности металла шва, получающейся

при чрезмерном газовойделении металла вследствие плохого качества обмазки электродов.

Механическим испытаниям подвергают образцы, вырезанные при сварке листов из контрольных пластины, а при сварке трубопроводов — из контрольных стыков. Для изготовления контрольных стыков и пластин применяют те же исходные материалы, методы сварки и сварочные режимы, что и при сварке изделий. При сварке продольных швов сосудов предусматривается припуск, из которого в дальнейшем изготовляют образцы для механических испытаний.

Механические испытания включают испытания на растяжение, на загиб или сплющивание, иногда испытания на ударную вязкость.

Для испытания на растяжение применяют плоский образец, в рабочую часть которого входит вся толщина сварного шва и достаточно большой участок околошовной зоны. В образец обязательно должна попасть околошовная зона, в которой за счет тепла металла шва в процессе сварки или после нее происходит перекристаллизация металла. Бракочным критерием служит предел прочности, который должен быть не меньше допустимого нижнего предела прочности основного металла.

Испытание на растяжение образца из сварного стыка может быть заменено испытанием на растяжение самого стыка. Для этого концы стыка сплющивают, снимают усиление сварного шва и испытывают такой трубчатый образец на разрывной машине.

Для испытания на загиб берут плоский образец прямоугольного сечения. При этом срезают усиление шва и подкладное кольцо. Схема испытания показана на рис. 4-10. Радиус оправки принимают обычно равным толщине образца, но не более 25 мм. Испытания прекращают, как только образовалась первая трещина. Если трещина не образуется, концы образцов загибают на 180° — пока они не станут параллельными. Угол загиба образцов углеродистой стали должен быть не менее 100° при электродуговой сварке и не менее 70° при газовой. Для легированных сталей различных марок в зависимости от толщины стенки и способа сварки величина требуемого загиба колеблется в пределах от 30 до 80° .

Для труб с внутренним диаметром до 100 мм испытание на загиб может быть заменено испытанием на сплющивание.

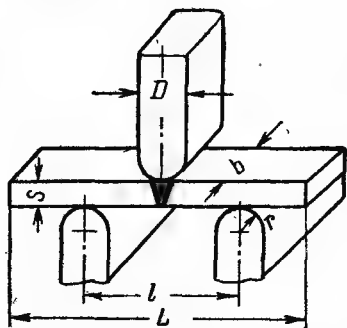


Рис. 4-10. Схема испытания образца на загиб: s — толщина образца; D — диаметр оправки, мм; r — радиус оправки; L — длина образца. Расстояние между нижними оправками $l = D + 2,5s$.

На разрыв и загиб должны быть испытаны по два образца.

Испытанию на ударную вязкость подвергают металл сосудов, работающих при 450°C или выше либо при давлении более 50 ат. Испытание на ударную вязкость, если оно предусмотрено техническими условиями, производят на трех или более образцах. Величина ударной вязкости для одной и той же стали колеблется в относительно более широких пределах, чем статические характеристики прочности.

Показатели механических свойств определяют как среднее арифметическое из результатов испытаний всех образцов данного контрольного стыка или пластины. Результаты испытаний считаются неудовлетворительными, если хотя бы у одного из образцов полученные значения выходят более чем на 10% за допускаемые пределы. Если ударная вязкость хотя бы на $2 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$ ниже нормы, то качество сварного соединения считается неудовлетворительным.

Если механические испытания дали неудовлетворительные результаты, допускаются повторные испытания на двойном числе образцов. Если при повторном испытании результат получился удовлетворительным, сосуд может быть допущен к эксплуатации. В случае неудовлетворительного результата повторного испытания хотя бы одного образца сосуд бракуют.

Металлографические исследования проводят, если сосуд предназначен для работы при температуре выше 450°C или при давлении более 50 ат. Его производят также в тех случаях, когда сосуд изготавливается из легированной стали, склонной к закалке на воздухе.

В процессе металлографического исследования выявляют макро- и микроскопические дефекты сварного шва: непровары, трещины, поры, шлаковые включения, а также устанавливают структуру металла.

Образец для металлографического исследования вырезают из контрольной пластины или стыка поперек оси шва. Образец должен включать в себя как шов, так и зону термического влияния. Поверхность шлифа тщательно шлифуют, полируют и травят.

В качестве примера на рис. 4-11 показан макрошлиф сварного соединения паропровода диаметром 273×28 мм из стали 12МХ.



Рис. 4-11. Макроструктура сварного соединения без термической обработки; верхний слой имеет литую структуру.

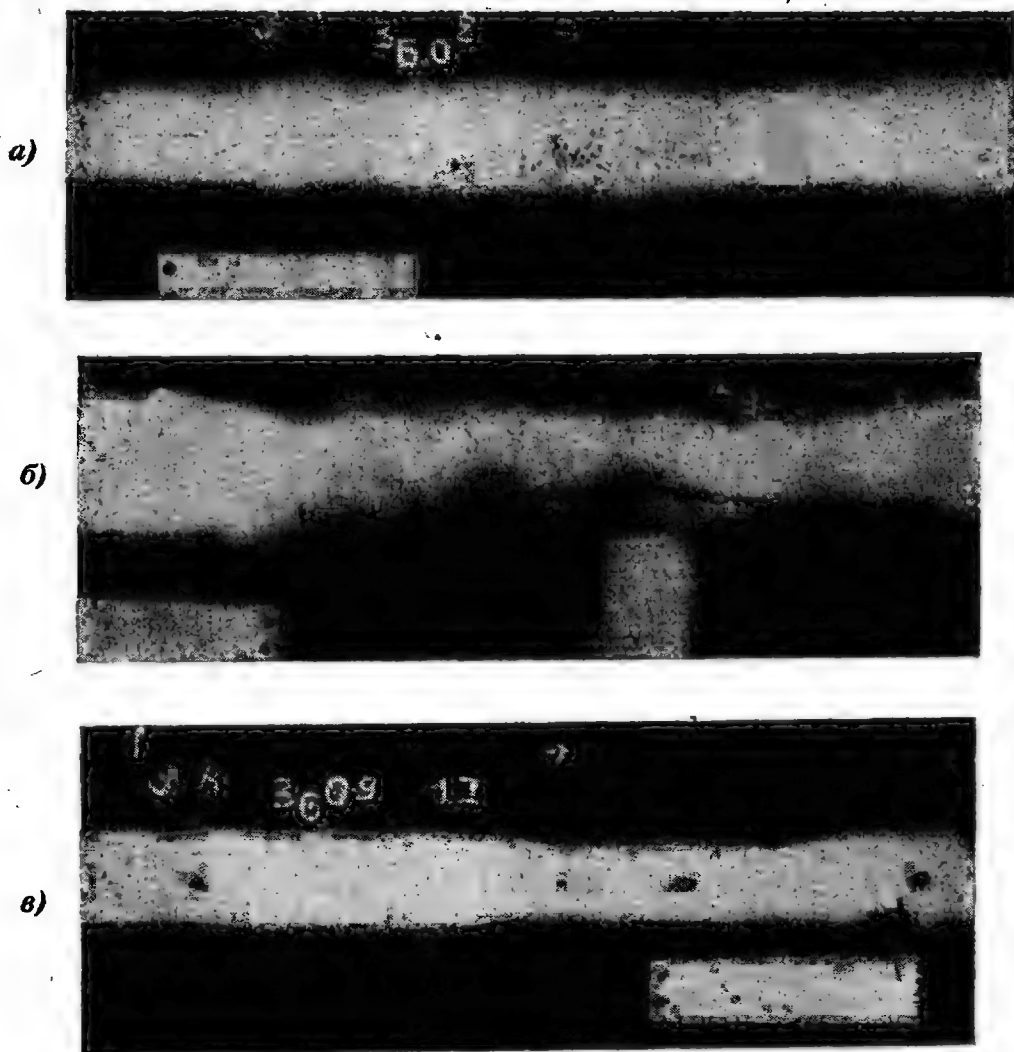


Рис. 4-12. Рентгенограммы дефектных мест сварных швов.
 а—газовые пузыри; б—трещины вдоль шва; в—шлаковые включения.

Трещины в основном металле шва, несварившиеся слои, крупные шлаковые включения, непровар сверх нормы не допускаются. Непровар не должен превышать при односторонней сварке без подкладного кольца 15% толщины стенки; если толщина стенки превышает 20 мм,— не более 3 мм.

При микроструктурном исследовании особое внимание обращают на выявление микротрещин и таких дефектов, как подкалка, которые могут снизить прочность паропровода при высокой температуре в ходе длительной эксплуатации.

Если металлографическое исследование дало неудовлетворительные результаты, сосуд к эксплуатации не допускается.

Сварные швы сосудов, работающих под давлением, должны проходить контроль рентгенопросвечиванием. Правилами Госгортехнадзора в зависимости от давления, под которым будет работать сосуд, и температуры рабочей среды устанавливают про-

цент длины сварных швов, подлежащих просвечиванию рентгеновыми лучами. Длина участков швов, подлежащих просвечиванию, колеблется от 10 до 25%. Места, подлежащие рентгеноскопическому контролю, выбирает ОТК завода-изготовителя.

На рентгенограмме сварной шов получается более светлым, так как шов имеет усиление и сильнее задерживает лучи; это обуславливает светлый фон шва. Дефекты сварки: непровар, газовые и шлаковые включения — получаются более темными, так как они лучше пропускают рентгеновые лучи. На снимке нельзя отличить газовые поры от шлаковых включений, однако это не имеет значения, так как они практически в одинаковой степени снижают прочность сварного соединения. Небольшие трещины и маленький непровар на снимке не обнаруживаются, для их выявления шов лучше проверять ультразвуком. Рентгенограммы дефектных мест сварных швов показаны на рис. 4-12.

Все дефекты сварных швов, выходящие за допустимые пределы, вырубают, а места вырубки заваривают. После заварки дефектных мест сварной шов просвечивают.

Если при первичном просвечивании были обнаружены дефекты сварного шва, то должно быть проведено повторное просвечивание такого же процента длины сварного шва, как при первоначальном просвечивании.

Сварные сосуды, предназначенные для работы под давлением, подвергают гидравлическому испытанию с целью проверки их прочности и плотности. Гидравлическое испытание проводит ОТК на заводе-изготовителе. Сварные сосуды испытывают полуторным рабочим давлением при рабочем давлении до 5 атм, но не менее 2 атм. Если рабочее давление 5 атм или выше, то пробное давление должно превышать рабочее на 25%, но величина пробного давления должна быть не менее 3 атм. Сосуды, работающие под давлением при температуре стенки выше 400° С, подвергаются гидравлической пробе на заводе-изготовителе полуторным рабочим давлением. При гидравлическом испытании не должно наблюдаться течи и потения швов.

Если сосуд должен быть покрыт эмалью, его подвергают гидравлическому испытанию до наложения эмали.

Для контроля качества сварных соединений сосудов и трубопроводов все чаще применяют ультразвуковую дефектоскопию.

Изготовление днищ и крышек

При изготовлении теплообменной и химической аппаратуры обычно применяют сферические и эллиптические днища, а также плоские доньшки и крышки.

Сферические и эллиптические днища следует изготавливать по возможности из одного листа. Допускается изготовление больших днищ из нескольких элементов, сваренных до штамповки,

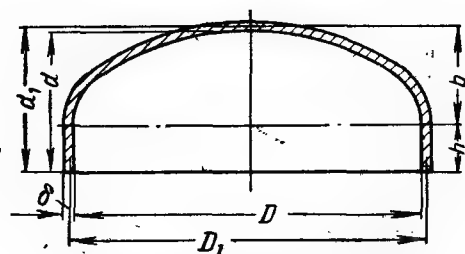


Рис. 4-13. Заготовка под днище.

днища листам штамповкой в горячем или холодном состоянии.

Лист, предназначенный для изготовления днища, предварительно размечают. Заготовка под днище (рис. 4-13) представляет собой круг, диаметр которого D_0 может быть определен по формуле

$$D_0 = L_{\text{раз}} + 2h - 2\delta + \Delta_{\text{пр}},$$

где $L_{\text{раз}}$ — длина развертки эллипса, мм;

h — высота цилиндрической части днища, мм;

δ — толщина днища, мм;

$\Delta_{\text{пр}}$ — припуск на обработку, мм.

Длину развертки эллипса $L_{\text{раз}}$ определяют по формуле

$$L_{\text{раз}} = \pi \frac{D_1 + d_1}{2} k,$$

где k — коэффициент длины развертки эллипса, зависящий от соотношения осей эллипса $\frac{D-d}{D+d}$, значения которого даны ниже:

$\frac{D-d}{D+d}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k	1,0025	1,0100	1,0226	1,0404	1,0635	1,0922	1,1267	1,1677	1,2155	1,2732

а также из штампованных элементов с последующей сваркой. Сварные швы следует располагать параллельно диаметру или по меридиональному сечению днища, либо по круговому. В последнем случае швы следует располагать вне переходной дуги днища.

При сварке днищ из штампованных секторов диаметр ввариваемого в сферу выпуклого диска должен быть не более 0,4 наружного диаметра днища.

Сферическая или эллиптическая форма придается заготовленным для

Эллиптические днища для сосудов, аппаратов и котлов, изготавливаемые заводами, можно подобрать по ГОСТ 6533-53.

Лист для изготовления днища не должен иметь трещин, закатов и расслоений. Круглая заготовка должна иметь правильную форму.

Небольшие днища из листов толщиной до 4 мм штампуют на прессах в холодном состоянии (рис. 4-14,а). При штамповке днищ в холодном состоянии радиус закругления кромок

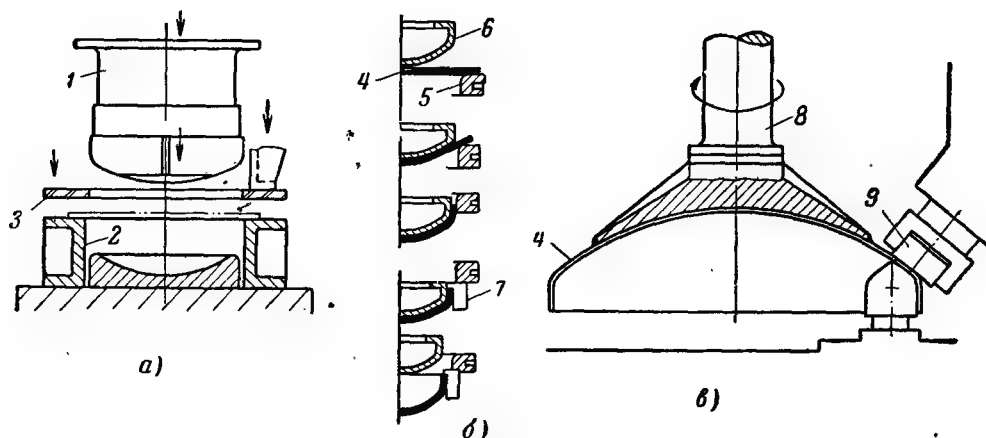


Рис. 4-14. Способы изготовления днищ.

а — штамповка в холодном состоянии; б — штамповка в горячем состоянии; в — обкатка на ротационном прессе.

матрицы должен быть по возможности большим, что уменьшает вероятность образования складок. Для днищ толщиной 4—6 мм величину радиуса определяют по формуле

$$R = 4\delta,$$

где δ — толщина днища.

Большие днища толщиной более 4 мм штампуют в горячем состоянии на гидравлическом прессе мощностью 750—1000 т и более. Заготовку предварительно нагревают до температуры 1050—1100°С с таким расчетом, чтобы штамповка заканчивалась при 880—900°С (температура нормализации).

Днища штампуют с одного нагрева за один двойной ход пресса (рис. 4-14, б): нагретую заготовку 4 укладывают концентрично на протяжное кольцо 5 штампа. Пуансон 6 штампа, имеющий форму днища и укрепленный на подвижной траверсе пресса, медленно опускаясь, постепенно протягивает заготовку через протяжное кольцо, формируя днище. По достижении пуансоном крайнего нижнего положения сбрасыватель 7 снимает с него готовое днище, и освобожденный пуансон перемещается в крайнее верхнее положение. Готовое днище извлекают из-под пресса краном или лебедкой.

В штампах некоторых конструкций пуансоны выполняют разрезными; после окончания штамповки диаметр пуансона сокращается и он свободно выходит из днища.

При изготовлении днищ с лазером

лазовый пуансон устанавливается на столе пресса и прошивает отверстие в днище, прежде чем оно приобретает конечную форму.

Наиболее совершенный способ изготовления выпуклых днищ — обкатка заготовок до нужной степени кривизны на ротационных прессах с помощью прижимных роликов.

На рис. 4-14, в представлена схема изготовления эллиптических и сферических днищ на ротационном прессе. Нагретая заготовка 4 вращается на вертикальной поддержке 8, обжимается верхним наклонным роликом 9 и постепенно приобретает нужную форму, с плавным переходом от сферы к цилиндрической части.

Такой способ позволяет изготавливать днища диаметром от 1300 до 5000 мм при толщине листа от 10 до 100 мм.

Устройство штуцеров, смотровых окон, люков и лазов на днищах и крышках допускается только при их размещении вне зоны переходной дуги и на расстоянии от крайней ее точки, равном или большем толщине стенки днища или крышки.

Применение аппаратов с шаровыми днищами ограничено установками с огневым обогревом.

Конические днища применяются в аппаратах, в которых происходит осаждение твердых частиц — шлама. В конических днищах сварной конструкции угол конуса составляет 30 или 45°, максимальное допускаемое рабочее давление 6 атм.

Если днища подвергаются механическому или химическому износу, рекомендуется делать на их нижней части накладки, закрепляемые в нескольких местах приваркой.

Максимальная конусность цилиндрической части днища толщиной до 20 мм допускается до 2 мм, толщиной более 20 мм — до 4 мм.

После обмера и технической приемки отштампованных днищ с них удаляют излишний припуск по борту и затем механически обрабатывают.

Припуск обрезают на карусельном станке или газокислородной горелкой. Механическая обработка заключается в планировке цилиндрической части днища, обработке плоскости лаза и высверливании отверстий.

Нормы на отклонения от формы днища по чертежу приведены в табл. 4-5.

Таблица 4-5

Допуски на основные размеры днищ, мм

Наружный диаметр днища D_H , мм	Допуск на наружный диаметр ΔD_H , мм	Овальность $D_H^B - D_H$, мм	Вогнутость, мм	Торцовое бегение после механической обработки, мм	Допуски на высоту сферы Δh
219—720	± 2	2	—2	—	± 4
800—1 200	± 3	4	—3	3	± 6
1 200—1 500	± 3	6	—4	4	± 8
1 800—2 400	± 5	8	—4	5	± 12
2 600—3 000	± 6	9	—4	8	± 16

Линзовые компенсаторы

Для жестких теплообменников обычно применяют линзовые компенсаторы, свариваемые между обечайками кожуха (рис. 4-15).

Линза тарельчатого компенсатора изготавливается из двух половинок, соединяемых дуговой электросваркой. Кольцеобразные заготовки, предназначенные для изготовления полулинз, вырезают из стального листа. При малых размерах листа заготовка может быть выполнена из нескольких частей. При наличии прессы достаточной мощности половинки линз могут быть выполнены из заготовок путем холодной штамповки.

При отсутствии прессы штамповка может быть заменена отбортовкой (обкаткой) кромок на карусельном стан-

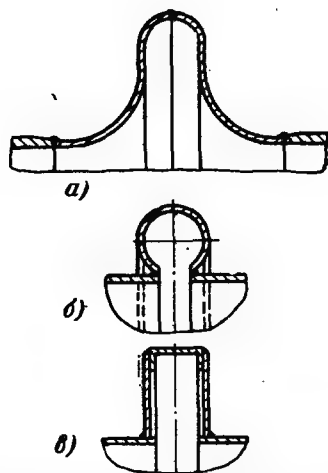


Рис. 4-15. Линзовые компенсаторы для трубчатых теплообменников.

а — тарельчатый; б — торцовый; в — трапециевидный.

ке с применением приспособления, указанного на рис. 4-16. Заготовку укладывают на кольцевую плиту, укрепленную на планшайбе станка, и плотно прижимают к ней через накладку струбцинами. Ролик, прикрепленный к одному из суппортов, обжимает внутренний край заготовки и отбортовывает ее внутреннюю кромку, затем резцом, укрепленным в другом суппорте, обрезают внутреннюю кром-

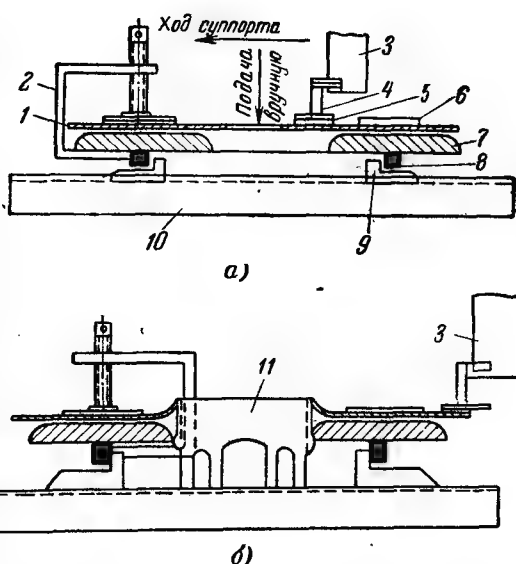


Рис. 4-16. Отбортовка кромок заготовки линзового компенсатора.

а — отбортовка внутренней кромки; б — отбортовка наружной кромки; 1 — заготовка; 2 — струбцина; 3 — суппорт; 4 — стойка ролика; 5 — ролик; 6 — прижимная накладка; 7 — кольцевая плита; 8 — бобышка; 9 — кулачок; 10 — планшайба станка; 11 — направляющая.

ку полулинзы. После окончания внутренней отбортовки заготовку поворачивают другой стороной к прижимной плите и устанавливают на направляющий вкладыш, закрепленный внутри плиты. Наружную кромку отбортовывают роликом первого суппорта, а затем обрезают резцом, укрепленным на втором суппорте.

Фланцевые соединения

Фланцевые соединения должны быть прочными и обеспечивать герметичность соединения. Типы и размеры фланцев подбирают по ГОСТ, перечисленным в табл. 4-6.

Таблица 4-6

ПЕРЕЧЕНЬ СТАНДАРТОВ

на фланцевые соединения для трубопроводов и аппаратов

ГОСТ 1234-54	Присоединительные размеры для фланцев арматуры, соединительных частей и трубопроводов
ГОСТ 1235-54	Фланцы чугунные литые— для давлений условных $P_y = 2,5-25 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 1240-54	Фланцы стальные литые— для давлений условных $P_y = 16-200 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 1245-52	Фланцы с шейкой на резьбе—для давлений условных $P_y = 2,5-16 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 1255-54	Фланцы плоские приварные—для давлений условных $P_y = 2,5-25 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 1260-54	Фланцы приварные в стык—для давлений условных $P_y = 2,5-200 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 1265-54	Фланцы свободные с буртом—для давлений условных $P_y = 40-100 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 1268-54	Фланцы свободные на приварном кольце—для давлений условных $P_y = 2,5-25 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 1272-54	Фланцы свободные на отбортованной трубе—для давлений условных $P_y = 2,5-6 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 6973-54	Заглушки фланцевые

Выбор типа фланцевого соединения (рис. 4-17) зависит от условий работы аппарата, давления, агрессивности среды, условий монтажа, технологических возможностей изготовления фланцев.

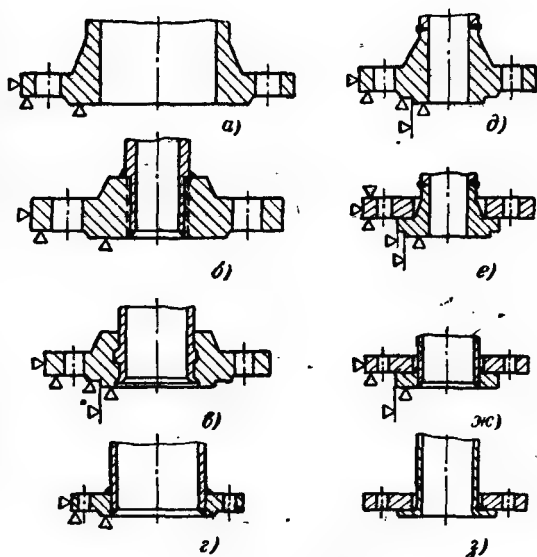


Рис. 4-17. Типы фланцев.

а—чугунные и стальные литые; б—стальные с шейкой на резьбе; в—стальные с шейкой под развальцовку; г—стальные плоские приварные; д—литые приварные в стык; е—стальные свободные с буртом; ж—стальные свободные на приварном кольце; з—стальные свободные на отбортованной трубе.

Фланцы небольшого диаметра изготавливают обычно из листовой стали. При диаметрах более 200 мм фланцы изготавливают из полосового проката путем гибки в горячем состоянии. Гибку и вырезку фланцев производят с учетом последующей механической обработки по диаметру и толщине. В табл. 4-7 приведены нормы припусков на обработку колец фланцев.

Таблица 4-7

Припуск на обработку колец фланцев

Внутренний диаметр колец, мм	Припуск на обработку, мм		
	по толщине кольца	по диаметру	
		внутреннему	наружному
400—600	2	3	3
700—1 000	3	4	4
1 000—1 600	4	5	5
1 700—2 600	5	6	6
2 700 и выше	6	8	8

Кольца для фланцев должны быть ровными, не иметь рванин, трещин и других дефектов.

Для установки на аппаратах допускаются плоские фланцы толщиной, превышающий проектную до 5 мм; фланцы толщиной меньше проектной

Таблица 4-8

Допускаемые отклонения в размерах фланцев в зависимости от диаметра

Диаметр фланца, мм	Допускаемые отклонения, мм		
	по внутреннему диаметру	по наружному диаметру	овальность
250—650	+1,5	±1,5	1,5
650—1 000	+2	±2	2
1 000—1 500	+2,5	±2,5	2,5
1 500—2 500	+3	±3	3
2 500 и выше	+4	±4	4

к установке не допускаются. В окончательно обработанных фланцах допускаются отклонения в размерах по сравнению с проектными в пределах, приведенных в табл. 4-8.

При установке фланцев на корпус или крышку аппарата проверяют их перпендикулярность относительно оси обечайки по наружным кромкам обработанных поверхностей. Допускаются следующие отклонения перпендикулярности плоскости фланцев относительно оси аппарата:

Диаметр фланца, мм	Допускаемое отклонение, мм
До 500	1
500—1 500	1,5
1 500—2 000	2
Более 2 000	3

Для аппаратов с рабочим давлением до 100 атм, а также работающих с ядовитыми и легковоспламеняющимися средами, применяют фланцы усиленного типа, в которых на поверхностях уплотнения имеются выступы и впадины или шипы и пазы.

Шаг болтов на фланцах выбирают не менее $2,5d$ и не более $4d$ (d — диаметр болта). Для фланцев всех диаметров разность в шаге отверстий под соединительные болты допускается в пределах ± 2 мм. Число болтов

должно быть кратным четырем, что обеспечивает возможность одинакового натяга всех болтов при монтаже. Болтовые отверстия соединяемых фланцев должны совпадать, а болты, находящиеся в них, не должны иметь перекосов и перегибов. Не допускается установка болтов меньшего размера, чем указано в табл. 4-9.

Под гайки рекомендуется ставить шайбы, которые должны хорошо прилегать к поверхностям фланца и гайки.

При затяжке гаек на болтах диаметром менее 16 мм применяют ключи стандартной длины без удлинителей во избежание перенапряжения болтов и их обрыва (табл. 4-10). В затянутом состоянии фланцы и болты не должны иметь следов деформаций, вызванных чрезмерной затяжкой болтов.

Плотность и прочность фланцевого соединения ухудшаются как при слишком слабой, так и при слишком сильной затяжке болтов и шпилек. При слабой затяжке уменьшается плотность соединения; при слишком сильной затяжке ускоряется разрушение прокладок и может произойти обрыв болтов и шпилек.

Для герметичности фланцевого соединения необходимо, чтобы прокладка не имела разрывов или дефектов стыковки. Параллельность фланцев при сборке аппарата проверяется щупом; в зависимости от давления допускается непараллельность фланцев на величину, указанную в табл. 4-11.

Приварка штуцеров и болышек. Штуцера диаметром более 200 мм приваривают к корпусу аппарата с помощью укрепляющих колец, а при диаметре до 200 мм — без них. Толщина кольца должна быть не меньше толщины обечайки.

Толщина стенки патрубка для штуцера определяется практическими соображениями, учитывающими:

а) возможность хорошей приварки штуцера к аппарату;

Таблица 4-9

Размеры болтов и диаметры проходных отверстий

Диаметр болта, мм	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	22	24	27	30
Диаметр проходного отверстия, мм	3,2	4,3	5,5	6,5	9	11	13	15	17	20	24	26	29	32

Таблица 4-10

Величины допускаемых усилий зажима болтов

Номинальный диаметр резьбы, мм	Величина приложенного усилия к ключу Р, кг	Длина ключа, мм	Допускаемое усилие зажима, кг
12	5	130	450
16	8	190	800
20	12	240	1 200
24	16	310	1 750
27	20	350	2 200

б) дополнительные напряжения в патрубке из-за присоединяемых к штуцеру трубопроводов;

в) возможность использования штуцера при подъемах и транспортировке аппарата;

г) достаточную прочность штуцера с учетом возможных ударов при транспортировке и монтаже аппарата;

д) повышенную изнашиваемость от коррозии и эрозии стенок штуцера.

Таблица 4-11

Допускаемая величина непараллельности фланцевых соединений в зависимости от давления

Диаметр прохода, мм	Допуск на непараллельность фланцевых соединений, мм, при рабочем давлении, кг/см ²		
	до 16	16—30	свыше 60
До 80	0,2	0,1	0,05
Свыше 80 . . .	0,3	0,1	0,05

Эти обстоятельства, не поддающиеся учету при расчете на прочность, обуславливают выбор толщины стенки патрубка для штуцера не менее расчетной, однако не меньше половины толщины стенки сосуда.

Сборка под сварку штуцеров с корпусом аппарата заключается в установке штуцеров в приготовленные для них отверстия. Отклонение центра штуцера на корпусе аппарата не должно превышать ± 10 мм от размеров по чертежу. Перекос поверхности уплотнения фланца должен быть не более 1 мм на каждые 100 мм наружного диаметра фланца, но не более 3 мм для фланца любого диаметра. Отклонение высоты штуцера над поверхностью аппарата не должно превышать ± 10 мм.

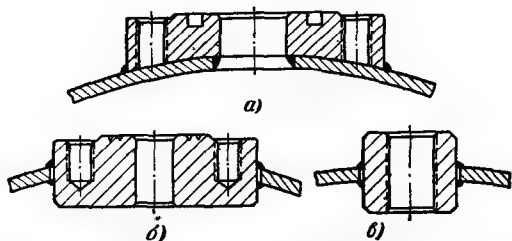


Рис. 4-18. Типы бобышек.

а — накладная под фланец; б — варная под фланец; в — варная под резьбу.

Установленный на аппарате штуцер прихватывают электросваркой, а затем, обваривают двойным угловым швом электродами с качественной обмазкой.

Кроме электросварки, штуцера иногда укрепляют в стенках аппаратов посредством резьбового соединения, развальцовкой или затяжкой отбортованного патрубка гайкой.

Бобышки крепятся на аппаратах одним из способов, показанных на рис. 4-18.

Общие требования при изготовлении сосудов и аппаратов. Сосуды внутренним диаметром более 800 мм должны быть снабжены лазами для внутреннего осмотра. Круглые лазы должны быть диаметром не менее 400 мм, овальные — не менее 300×400 мм. Сосуды внутренним диаметром 800 мм и менее должны иметь отверстия, через которые можно осматривать стенки сосуда и удалять из него грязь и шлам. Исключение составляют трубчатые теплообменники, состоящие из цилиндрического корпуса и двух трубных досок с завальцованными в них трубками, которые разрешается изготовлять без лазов независимо от диаметра сосуда.

Лазы не предусматривают, если сосуды имеют съемные днища или крышки, дающие возможность доступа для внутреннего осмотра и имеющие размеры не менее указанных выше.

Если в сосудах установлены мешалки, змеевики, перегородки и тому подобные приспособления, то таковые, если они препятствуют внутреннему осмотру, должны быть сделаны съемными.

Рубашки для наружного обогрева или охлаждения сосудов разрешается изготовлять как съемными, так и приварными.

Болты, вкладываемые в прорези, хомуты и всякие зажимные приспособления, должны иметь предохранения от сдвига или ослабления.

Поворотные реакторы и варочные котлы должны иметь приспособления, предотвращающие их опрокидывание, когда в нем нет необходимости.

Люки и лазы. Расположение люков и лазов должно обеспечивать удобные осмотр и ремонт аппарата.

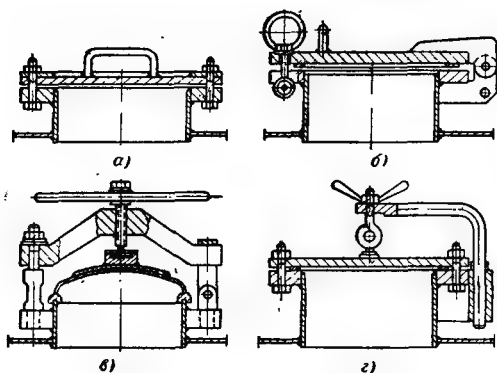


Рис. 4-19. Люки и лазы для теплообменной аппаратуры низкого и среднего давлений.

а—люк с плоской крышкой на болтах; *б*—люк с плоской крышкой на петле; *в*—овальный люк с вставной крышкой; *г*—люк с плоской крышкой на кронштейне.

Люки и лазы должны обеспечивать герметичность аппарата и не нарушать его прочность.

Для теплообменной аппаратуры низкого и среднего давлений применяют люки в виде штуцера большого диаметра с плоской крышкой на болтах, с плоской крышкой на кронштейнах, с плоской крышкой на петле или со сферической крышкой на скобе (рис. 4-19).

Для теплообменников высокого давления часто применяют люки с внутренней крышкой и натяжной скобой (рис. 4-20).

Во всех случаях установки люков, лазов и отверстий для взятия проб должна быть обеспечена полная герметизация на плоскостях соприкосновения крышки с аппаратом.

Смотровые окна в теплоиспользующих и реакционных аппаратах служат для наблюдения за уровнем жидкости, процессом кипения или ходом реакции (рис. 4-21, *а* и *б*).

Смотровые окна выполняют круглыми и прямоугольными. Круглые

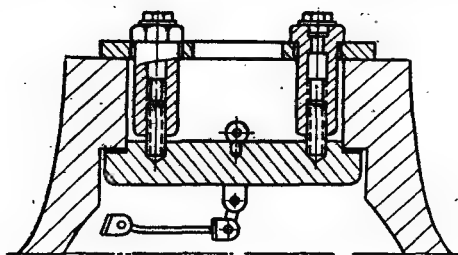


Рис. 4-20. Люк для теплообменников высокого давления.

окна имеют стекла диаметром 60 и 165 мм и толщину 10 и 20 мм соответственно. Стекла устанавливают с помощью двух мягких прокладок между кольцами, одно из которых приваривается к стенке аппарата, а второе прижимается шпильками. Прямоугольные окна представляют собой рамку, в которую вкладывают на мягких прокладках стекло сечением 17×34 мм и длиной до 320 мм, имеющее продольные канавки, которые благодаря преломлению в них света облегчают наблюдение за уровнем жидкости.

Часто для удобства наблюдения ставят несколько, смотровых окон по высоте окружности аппарата, причем одно из окон освещается электрической лампочкой.

Гильзы предназначены для установки в них стеклянных термометров или термпар. Их изготовляют из куска трубы с заваренным наглухо концом и присоединяют к корпусу аппарата при помощи фланцев (рис. 4-22, *а*) или приваркой (рис. 4-22, *б* и *в*). Иногда применяют латунные гильзы, ввертываемые в приваренный патрубок (рис. 4-22, *г*). Длинные гильзы делают из толстых труб или усиливают ребрами жесткости.

Лапы и опоры. Лапы приваривают к цилиндрической части аппарата так, чтобы нижнюю его часть было удобно обслуживать.

Опоры ставят под аппаратом; при большом весе жидкости в сосуде они создают дополнительные напряжения в корпусе.

Горизонтальные сосуды можно устанавливать на опорах, поверхность которых должна охватывать сосуд по дуге не менее $\frac{1}{3}$ проекции диаметра. Расстояние между краями сварных швов аппарата и местами приварки лап или опор должно быть не меньше толщины стенки аппарата.

Термическая обработка. В элементах аппаратов и сосудов, изготовленных с помощью сварки, вследствие усадки швов возникают термические напряжения — большие в кольцевых и меньшие в продольных швах.

По Правилам Госгортехнадзора сосуды, изготовленные из малоуглеродистой стали при толщине стенки более 25 мм или изготовленные из легиро-

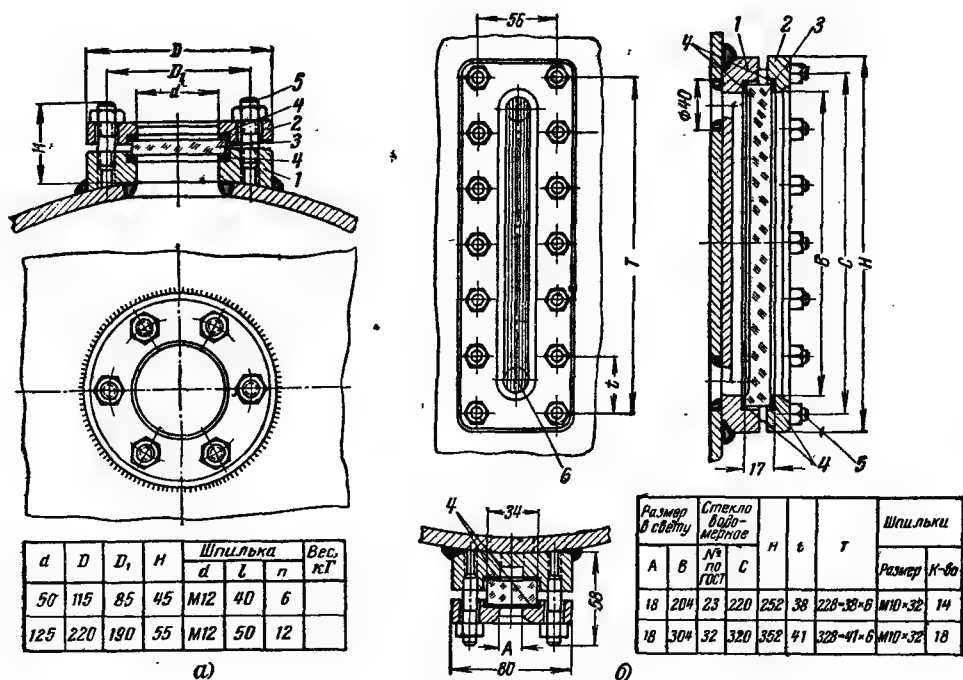


Рис. 4-21. Смотровые окна.

а — круглое; б — продольное; 1 — бобышка; 2 — фланец; 3 — стекло; 4 — прокладки; 5 — болты; 6 — продольные канавки.

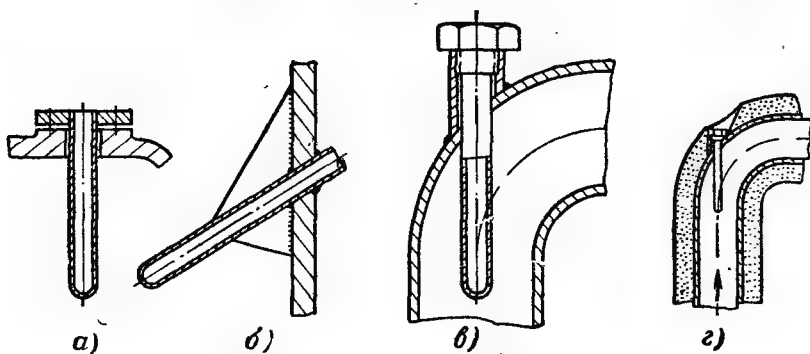


Рис. 4-22. Установка гильз для термометров.

а — гильза с фланцем; б — гильза, сваренная в корпус с укрепляющими косынками; в и г — гильза латунная, ввернутая в приваренный патрубок.

ванной стали при толщине стенки более 10 мм. подвергаются обязательной термической обработке для снятия напряжений при температуре 620—650° С.

Изготовление и сборка трубчатки

Трубчатка собирается из трубных досок (решеток) и труб. В некоторых конструкциях теплообменников трубчатка включают в себя перегородки (продольные или поперечные) и каркасы, служащие основой для сборки трубной системы (рис. 4-23).

Трубные доски изготавливают из листовой стали, в особых случаях — из меди или других металлов и сплавов.

Отобранные по качеству и габаритам листы правят на листопрямильных вальцах. На выправленных листах размечают контуры для вырезки круга и обработки поверхности под фланцы. Вырезку заготовок для досок производят автоматической или полуавтоматической газовой резкой. Вырезанные заготовки обрабатывают на карусельном станке — по торцу круга и плоскости прокладки. При изготовле-

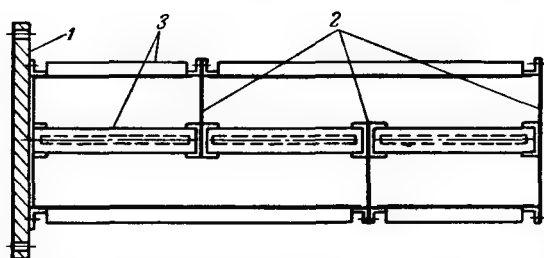


Рис. 4-23. Каркас с трубной доской и перегородками для водоподогревателя с U-образными трубками.

1—трубная доска; 2—перегородки; 3—продольные связи каркаса.

нии доски для многоходового теплообменника чистовой обработке подвергают или всю ее поверхность, что необходимо для герметичности соединения доски с крышкой, или под перегородками крышки выбирается канавка для закладки уплотнительного материала.

После наружной обработки заготовку размечают для сверления отверстий для труб, болтовых соединений и анкерных связей. В зависимости от размещения труб отверстия в досках сверлят по окружностям или по ромбической сетке. При этом пользуются спиральными сверлами, диаметр которых должен быть больше наружного диаметра трубы на 1—2% и может быть выбран по табл. 4-12.

Таблица 4-12

Диаметры отверстий под развальцовку труб в трубных досках теплообменников

Диаметр отверстия (очка), мм	Номинальный наружный диаметр трубы, мм				
	38	51	83	102	108
Максимальный	38,9	52,0	84,4	103,6	109,65
Минимальный	38,6	51,7	84,0	103,2	109,25

Для обеспечения соосности и цилиндричности отверстий в трубных досках и промежуточных перегородках аппарата отверстия сверлят по кондуктору или пакетом. При сверлении пакетом размечают одну доску, после чего доски и перегородки собирают в пакет и зажимают струбцинами. На радиально-сверлильном станке производят сначала центровку (сверлом малого диаметра) и далее сверление отверстий сверлом проходного диаметра.

Если после сверления отверстий должна производиться обработка отверстий в трубных досках, то пакет из досок и перегородок может быть скреплен электроприхваткой. Перед разборкой на каждой трубной доске и перегородке делают метку, что позволяет правильно установить их при сборке с трубами. После разбора пакета во всех отверстиях трубных досок удаляют заусенцы с помощью пневматических шарошек или на радиально-сверлильных станках.

Трубные доски большого диаметра после сверловки иногда правят на листопрямильных вальцах, а потом обрабатывают для получения правильной поверхности соприкосновения доски с фланцами.

Заготовка труб. Перед механической обработкой трубы отбирают по диаметру, длине и качеству. Испытания труб производят на выборку — по несколько штук из каждой партии (до 10%): на растяжение, на изгиб и на внутреннее давление — в соответствии с ГОСТ.

Трубы большого диаметра, имеющие вмятины, можно править металлическим шаром, закрепленным на тросе лебедки. Диаметр шара должен быть на 1—2 мм меньше внутреннего диаметра трубы. Перед протяжкой шара дефектное место нагревают до красного каления в горне или газовой горелкой. Тонкостенные трубы можно править штангой с калиброванной оправкой на конце, которую прогоняют через трубу с помощью гидравлического пресса или ударами молотка по штанге. Свинцовые трубы можно выправить нагнетанием в заглушенную трубу сжатого воздуха или воды под давлением до 10 кг/см².

В особо ответственных случаях для точной подгонки диаметра труб к диаметру отверстий в досках производят обсадку труб на специальной оправке.

Трубы изгибают на трубогибочных станках с электромеханическим, гидравлическим или ручным приводом в соответствии с шаблонами. В зависимости от диаметра и радиусагиба трубы можно гнуть в холодном или горячем состоянии, пустыми или

для уменьшения овальности в местегиба набитыми сухим песком.

В местах гибов труб допускается следующая овальность:

Условный проход трубы, мм	32	40	50	70	80	100	125	150
Овальность $D_{\text{макс}} - D_{\text{мин}}$, не более мм	3	3,5	3,6	4,5	4,9	7,1	10	12

Подготовленные трубы отрезают на трубоотрезных или токарных станках с помощью точно установленных упоров.

Для отрезки труб применяют также дисковые пилы, однако при этом концы труб нужно дополнительно зачищать от наплывов металла и заусенцев. Разработаны конструкции трубоотрезных станков с резцовыми головками, на которых отрезка труб совмещается с подготовкой кромок под сварку. Отрезка труб абразивными кругами дает наиболее чистую плоскость разреза и может быть использована для получения косых срезов труб. При малом числе отрезаемых труб можно пользоваться ножовками. Перед заведением труб в трубную доску проверяют зачистку их концов и состояние внешней и внутренней поверхностей.

При сборке трубчатки прямые трубы вставляют в отверстие одной доски и прогоняют по всей длине до другой трубной доски; U- и W-образные трубы вставляют в отверстия

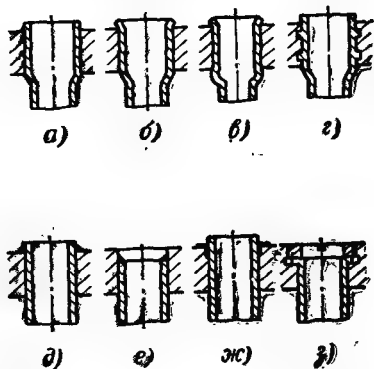


Рис. 4-24. Способы закрепления труб в трубных досках.

а — развальцовка; б — развальцовка с отбортовкой; в — развальцовка с двойной отбортовкой; г — развальцовка в очках с канавками; д и е — приварка; ж — запайка; з — крепление втулкой на резьбе.

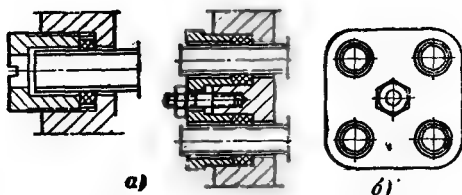


Рис. 4-25. Закрепление труб с помощью сальников.

а — сальник для одной трубы; б — сальник для четырех труб.

доски с внутренней стороны трубчатки двумя концами одновременно.

В досках трубы закрепляют различными способами: развальцовкой, заваркой, запайкой, втулкой на резьбе (рис. 4-24) или с помощью сальников (рис. 4-25).

В теплообменниках широко применяется закрепление труб развальцовкой, так как при таком креплении можно легко заменять трубы в случае появления в них дефектов. Заварка труб применяется в тех случаях, когда в теплообменнике отсутствует коррозия и требуется особая герметичность. Сварку применяют также при установке трудноулачиваемых толстостенных труб или при высоких температурах эксплуатации аппарата (500°С и выше).

При особо высоких требованиях прочности и плотности соединений трубы крепят электросваркой. При правильном выборе металлов трубной решетки, трубок и электродов электросварка обеспечивает прочность на 50% выше, чем при других методах. Так, трубные решетки из морской латуни и трубы из мышьяковистой меди сваривают вольфрамовыми электродами в атмосфере инертного газа (аргонодуговая сварка). Имеется также положительный опыт замены ручной заварки труб полуавтоматической заваркой с помощью сварочного пистолета.

Для укрепления труб из цветных металлов применяют запайвание. Однако в этом случае вследствие местных перегревов коробится трубная доска. Кроме того, прочность крепления при пайке недостаточна.

Сальниковое крепление труб применяют очень редко. Оно целесообразно только в тех случаях, когда температурные удлинения труб вели-

ки, а величины давлений обменивающихся теплом сред практически одинаковы.

Развальцовка является наиболее распространенным в аппаратостроении способом крепления труб.

Под прочностью развальцовки понимается максимальная осевая сила, выраженная в килограммах на 1 см наружного периметра трубы, которая способна вырвать трубу из гнезда. Если на каждую трубу наружным диаметром d_n [см] приходится площадь трубной доски f [см²], то при рабочем давлении P [кг/см²] на погонный сантиметр наружного диаметра поперечного сечения трубы приходится напряжение

$$\sigma = \frac{Pf}{\pi d_n} \text{ [кг/см]}.$$

Для обеспечения достаточной прочности развальцовки величина σ не должна превышать:

для концов труб, развальцованных в цилиндрических отверстиях, гладких и с канавками, 40 кг/см;

для концов труб, развальцованных в гладких цилиндрических отверстиях с последующей отбортовкой труб с одного конца, 50 кг/см;

для труб, развальцованных в гладких цилиндрических отверстиях и отбортованных с двух концов, 70 кг/см.

Под плотностью развальцовки понимается способность соединения сопротивляться гидравлическому давлению воды, заполняющей трубы, выраженному в кг/см².

Сущность развальцовки заключается в холодной расдаче труб в гнезда трубной доски путем раскатки роликами вальцовки под действием вращаемого конуса (рис. 4-26).

Вальцовки бывают ручные, с пневматическим или электрическим приводом с гибким валом. По способу подачи конуса они разде-

ляются на винтовые и самоподающие. Винтовые вальцовки (рис. 4-26, а) просты в установке и удобны. Однако подача конуса осуществляется в них с помощью нажимного винта периодически по мере ослабления давления роликов на стенку трубы. Вследствие периодичности их действия и уменьшения давления роликов по мере раскатки винтовые вальцовки редко применяют для массового укрепления труб.

Самоподающие вальцовки (рис. 4-26, б) вследствие некоторого перекоса окол для роликов относительно оси конуса как бы «ввинчиваются» в трубу при вращении конуса: процесс развальцовки самоподающим инструментом протекает непрерывно при возрастающем давлении роликов на трубу, что обеспечивает высокое качество и быстроту сборки. На рис. 4-26, в изображена самоподающая вальцовка с бортовочными роликами.

При вращении конуса осевой силой ролики в корпусе вращаются и передают радиальное давление на стенку трубы. Труба раздается и приходит в соприкосновение со стенкой очка. При дальнейшем вращении конуса давление от роликов передается через стенку трубы на стенку очка. Металл трубы, зажатый между роликами и стенкой очка, деформируется и заполняет промежутки между поверхностями соприкосновения, чем достигается плотность соединения. В процессе развальцовки металл трубы воспринимает остаточную деформацию, а прилегающий к трубе металл доски — упругую деформацию. Упругая деформация очка и остаточная деформация трубы создают силы трения между поверхностями, обеспечивающие необходимую прочность соединения.

Для высокого качества развальцовки необходимы следующие условия:

1. Металл труб должен быть пластичнее (мягче) металла трубной доски, а последний в результате вальцовки не должен воспринимать остаточной деформации.

2. Начальная величина зазора между трубой и стенкой очка должна быть минимальной (не более 0,5 мм). Учитывая возможные отступления в размерах труб и отверстий для них, иногда трубы подбирают по очкам индивидуально.

3. Поверхности концов труб и стенок очка должны быть чисто обработанными, свободными от масла, ржавчины и других налетов и загрязнений.

4. Длина конца трубы, выступающего над трубной доской, не должна превышать 5—8 мм для труб диаметром до 32 мм и 10—12 мм для труб диаметром более 32 мм. Отбортовка конца трубы (образование колокольчика) увеличивает прочность и плотность развальцовки. Начало колокольчика должно уходить в глубь очка на 1—2 мм. Угол отбортовки должен быть таким, чтобы диаметр отбортованного края колокольчика не превышал диаметры трубы более, чем на 10%.

5. Концентрические канавки на поверхности очка увеличивают прочность развальцовки.

В табл. 4-13 приведены результаты сравнительных испытаний трубной доски толщиной 25 мм с гладкими очками и с очками, на стенах которых вырезаны две канавки шириной 5 мм и глубиной 0,5 мм.

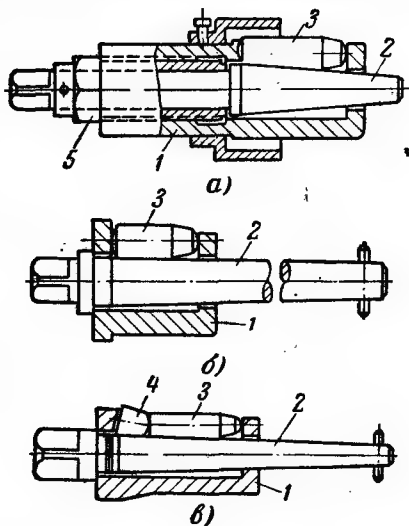


Рис. 4-26. Типы вальцовок.

а — винтовая; б — самоподающая крепежная; в — самоподающая бортовочная; 1 — корпус; 2 — конус (веретено); 3 — вальцовочный ролик; 4 — бортовочный ролик; 5 — нажимной винт.

Таблица 4-13

Прочность развальцовки труб в гнездах без канавок и с канавками

Диаметр трубы, мм		Прочность развальцовки, кг	
наружный	внутренний	без канавок	с канавками
21	14	4 800	7 600
27	20	3 500	9 000
33	27	3 900	9 400
44	36	5 300	10 000
60	50	5 800	} более 10 000
78	63	6 200	

Изготовление канавок в очке значительно удорожает стоимость работ, поэтому их выполняют только в тех случаях, когда необходимая прочность соединения не может быть достигнута развальцовкой в гладком очке и последующей отбортовкой выпущенного конца трубы. Глубина канавок не должна превышать 0,5 мм.

6. Полная раздача трубы должна быть достигнута за 4—5 оборотов корпуса вальцовки.

7. Машинная развальцовка обеспечивает большую плотность и прочность, чем ручная (результаты опытов с трубами диаметром 83/73 мм при толщине трубной доски 20 мм приведены в табл. 4-14).

8. Степень развальцовки должна быть оптимальной, так как недовальцовка или перевальцовка снижают прочность и плотность соединения.

Наиболее распространенным показателем степени развальцовки служит суммарная деформация трубы (уменьшение толщины ее стенки) и вальцовочного очка (увеличение его диаметра), получаемая с момента соприкосновения стенки трубы со стенкой очка.

Если обозначить (рис. 4-27)

Δd — величину остаточной деформации стенки трубы;

$\Delta \delta$ — величину остаточной деформации очка;

h — величину дополнительного расширения трубы после соприкосновения с очком, то зависимость между этими величинами можно записать как

$$h = 2\Delta d + \Delta \delta.$$

Это же можно выразить как

$$h = d_2 - (d_1 + s),$$

где d_1 — внутренний диаметр трубы до развальцовки;

d_2 — внутренний диаметр трубы после развальцовки;

s — начальный зазор между трубой и стенкой очка.

Для оценки качества развальцовки принят термин „степень развальцовки“, величина которой может быть выражена как

$$H = \frac{d_2 - (d_1 + s)}{d_1 + 2\delta + s} \cdot 100.$$

Степень развальцовки в пределах от 0,15 до 0,35% дает наиболее высокие показатели

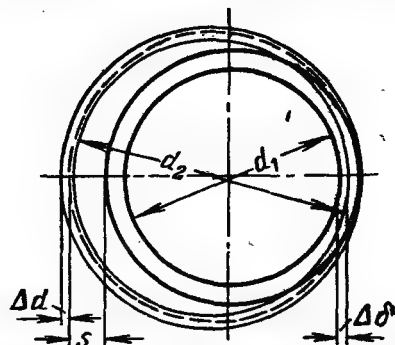


Рис. 4-27. Схема к определению степени развальцовки.

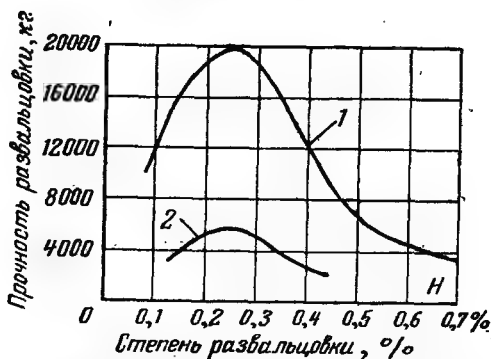


Рис. 4-28. Диаграмма для определения прочности развальцовки труб.

1 — труба диаметром 102 мм с толщиной стенки 5,75 мм при толщине трубной доски 30 мм; 2 — труба диаметром 37,5 мм с толщиной стенки 3 мм при толщине трубной доски 25 мм.

прочности и плотности вальцовочного соединения (рис. 4,28). Особо тщательный контроль степени развальцовки необходим для укрепления труб в сосудах высокого давления.

Таблица 4-14

Сравнение качественных показателей машинной и ручной развальцовки труб

Способ вальцовки	Число повторных вальцовок	Средняя плотность, кг/см ²	Средняя прочность, кг/см	Трубная доска		Труба
				расширение отверстия, %	утолщение тела, %	уменьшение толщины стенки, %
Машинная трехроликовая	3	143	27 300	1,80	7,40	14,9
	5	123	26 600	1,76	8,80	25,3
Ручная трехроликовая	5	60	22 400	0,68	3,40	19,0

Для объективного контроля за степенью развальцовки по перемещению конуса относительно корпуса вальцовки применяют специальные вальцовки с удлиненным конусом, на котором нанесена шкала с нониусом.

9. Толщина трубной доски не должна превышать определенного предела, после которого прочность вальцовочного соединения снижается.

10. Прочность развальцовки увеличивается при увеличении предела текучести металла трубной доски.

При развальцовке труб следует наблюдать, чтобы не возникали следующие дефекты:

1) недовальцовка, определяемая отсутствием заметного на ощупь характерного перехода, между развальцованной и неразвальцованной частями трубы, а также наличием зазора между трубной доской и трубой;

2) перевальцовка, которая определяется по чрезмерной длине колокольчика, а также по раздутому выходу трубы за трубной доской;

3) односторонняя вальцовка, представляющая собой одностороннее выпучивание трубы на выходе из очка;

4) шероховатость развальцованной части трубы, наблюдающаяся вследствие изношенности роликов вальцовки;

5) подрез трубы по кромкам очка трубной доски;

6) трещины или разрывы в вальцованной части трубы или в колокольчике.

Дефекты вальцовки, обнаруженные в процессе сборки или при испытаниях соединения на прочность и плотность, следует устранить повторной подвальцовкой (однако не более 2 раз), а в случае необходимости — заменить трубы.

Для укрепления труб развальцовкой применяют также гидравлическую вальцовку, показанную на рис. 4-29. Она состоит из направляющей втулки, конического штока с подвижными сухарями и гидравлического двигателя с масляным насосом.

Перед началом операции вальцовку вместе с сухарями и направляющей втулкой вводят внутрь трубы. При включении гидравлического мотора конический шток втягивается внутрь двигателя, сухари раздвигаются и раздают трубу на величину, обеспечивающую плотное закрепление ее в очке. При таком способе вальцовки труба не испытывает осевых сил, поэтому нет необходимости раздавать под колокольчик выступающий конец трубы.

Масляный насос с бачком для масла монтируется на тележке, что делает все устройство компактным и портативным. Гидравлической вальцовкой можно укреплять трубы диаметром от 18 до 150 мм.

Изготовление ребристых труб (кроме литых)

Ребристые трубы для теплообменников обычно изготавливают на специальных станках напрессовкой на гладкие трубы прямоугольных или круглых пластин — «шайб» (рис. 1-9,а) или навивкой поставленной на ребро ленты (рис. 1-9,б). Разработана также технология производства труб с поперечными ребрами путем прокатки толстостенных труб-заготовок.

Оребрение гладкой трубы проволокой производится на специальных станках путем навивки на нее в виде спирали медной проволоки, свернутой также в спираль, и закрепления ее на трубе двумя медными проволоками, продернутыми внутри спирали (рис. 1-9,г). При изготовлении трубы с проволочным оребрением наматывается также проволока, предназначенная для припайки спирали и лужения трубы. Расплавление припоя осуществляется нагреванием всей трубы электрическим током.

Для электрических генераторов изготавливают газо- и воздухоохладители из труб с проволочным «биспиральным» оребрением со следующей характеристикой:

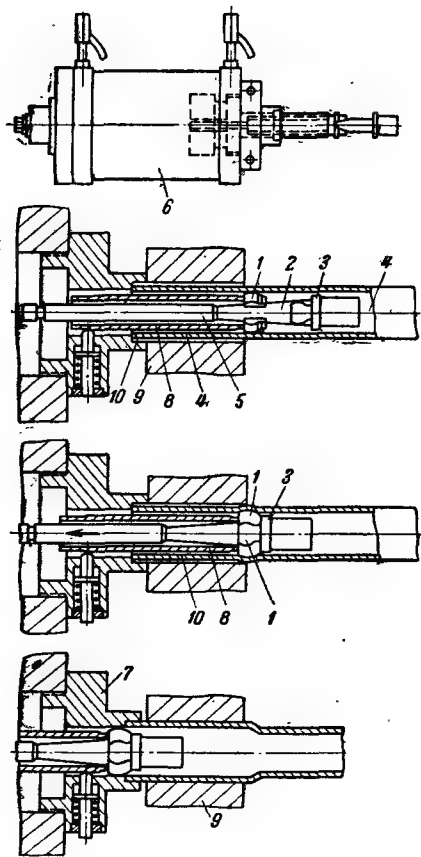


Рис. 4-29. Гидравлическая вальцовка для труб.
1 — подвижные сухари; 2 — конусная часть штока; 3 — упорный борт штока; 4 — труба; 5 — шток; 6 — гидравлический двигатель; 7 — упорная крышка гидравлического двигателя; 8 — направляющая втулка; 9 — трубная решетка; 10 — зазор между трубой и трубной решеткой.

	Тип А	Тип Б
Материал несущих труб . . .	Латунные диаметром 19/17 мм	
Материал проволочной спирали	Медные диаметром 0,69 мм	
Диаметр труб со спиралью, мм	54	44
Число спиралей на 1 пог. м трубы	142	200
Число витков по окружности	55	55
Поверхность теплообмена 1 пог. м трубы, м ²		
омываемая воздухом	0,665	0,616
омываемая водой	0,0535	0,0535
Расположение труб	Шахматное	
Поперечный шаг, мм	57	50
Продольный шаг, мм	49,5	37

Для хорошего контакта между поверхностью трубы и элементами оребрения (шайбы, ленты, плавники) трубы или весь теплообменник после сборки погружают в ванну с расплавленным цинком. Оцинковка труб предохраняет их также от коррозии.

Изготовление пластинчатых теплообменников

Пластинчатые теплообменники имеют большую поверхность теплообмена на единицу объема аппарата. Теплообменники из гладких листов

имеют существенные недостатки и мало эффективны. Более эффективны пластинчатые аппараты с профильными поверхностями нагрева, состоящими из двугрулых или овальных труб, в которых совмещены преимущества пластинчатых и трубчатых теплообменников, особенно при изготовлении поверхностей нагрева из штампованных листов.

Невский машиностроительный завод имени В. И. Ленина изготавливает штампованные пластинчатые теплообменники для газотурбинных установок [Л. 2].

Стальные листы толщиной 0,5—1 мм штампуют, в результате чего на листе образуются параллельные ряды выступов, имеющих овалообразную форму и расположенных в шахматном порядке. В продольном направлении (рис. 4-30, разрез по ББ) лист имеет прерывистый контур, состоящий из прямых участков длиной t с шагом s_2 и закругленных впадин длиной $s_2 - t$. В поперечном направлении лист имеет волнообразный профиль (разрез по АА). Крайние ряды выступов расположены от кромок листа на расстояниях, отличающихся на полшага $s_1/2$.

Опытные образцы аппаратов изготовлены заводом с различными линейными размерами профилей. Размеры наиболее крупного профиля, мм:

шаг между рядами выступов . . .	s_1 — 40
шаг выступов по длине ряда . . .	s_2 — 115
ширина канала в свету	e — 11
длина выступа	t — 100

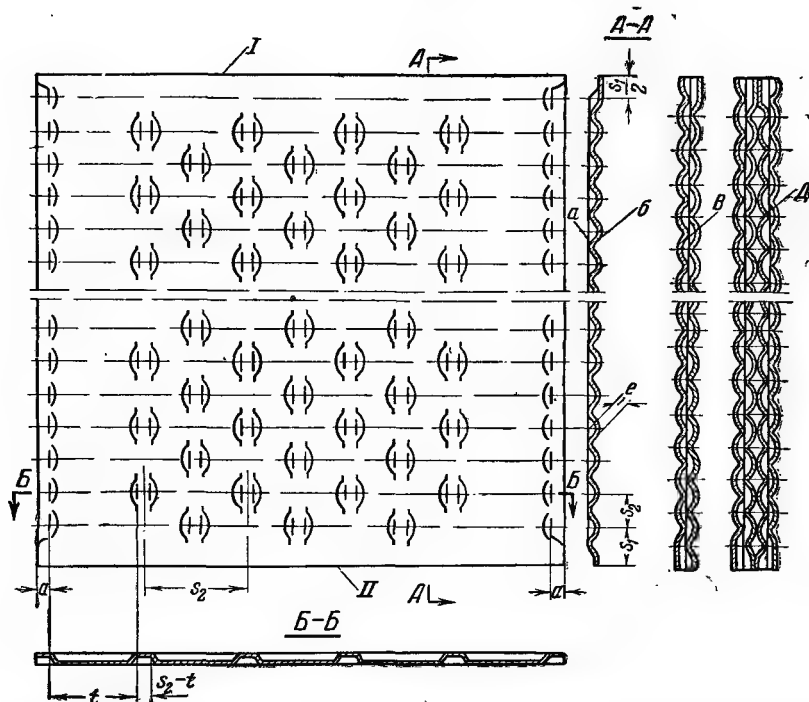


Рис. 4-30. Овалообразный штампованный лист для пластинчатого теплообменника НЗЛ.

Два листа, сложенных вместе по плоскостям *б* с совмещением кромок листов *I* и *II*, образуют элемент с волнообразным каналом *В*. При совмещении двух элементов с волнообразными каналами выступами *Б* образуются двугольные каналы *Д*, расположенные перпендикулярно к первым.

Со стороны входа воздуха сложенные вместе листы образуют входные участки прямоугольного сечения. Со стороны прямоугольных каналов образуется решетка, напоминающая соты.

Шахматный порядок выступов придает листам равномерную жесткость по всей поверхности, а соприкосновение соседних листов позволяет пакету воспринимать перепад давлений между теплоносителями до 15 ат.

Из соображений прочности ширина плоских кромок листа должна быть минимальной и определяться только условиями сварки.

Пакет, образующий один ход для воздуха, собирают в следующем порядке. Листы складывают попарно и заваривают по кромкам; при этом образуется внутренний волнообразный канал для прохода воздуха. Для этой операции наиболее целесообразна роликовая контактная электросварка. Заготовленные пары листов собирают в пакет, в котором образуются каналы для прохода газов. Сварку пакетов — газовую или аргонодуговую — производят по отбортовке. Края пакета со сто-

роны входа и выхода газов образуют зубчатую линию, по конфигурации которой из листовой стали вырезают гребенку *А* (рис. 4-31, *а*). По двум другим сторонам образующегося фланца пакет окантовывают планками *Б*. Гребенки и планки соединяют с пакетом сваркой путем оплавления кромок листов, получая прямоугольную рамку, к которой приваривают короб.

В зависимости от поверхности теплопередачи короба соединяют между собой, образуя секции с перекрестным движением потоков. К крайним коробам присоединяют трубопроводы (рис. 4-31, *б*).

Для восприятия внутреннего давления короба закрывают с боков прочными стенками, соединенными стяжками. Боковые стенки, могут быть выполнены общими на всю секцию или отдельно для каждого пакета.

Изготовление спиральных теплообменников

Корпус спирального теплообменника (рис. 1-11) существенно отличается от корпусов обычных аппаратов. Спиральный теплообменник представляет собой свернутые в спирали два листа, изготовленных из углеродистой или легированной стали, меди, латуни или других металлов. Толщина стальных листов для спиралей принимается от 2 до 8 мм, высота каналов — от 6 до 15 мм, ширина спирали от 350 до 1600 мм. Длина листа для спирали принимается в зависимости от ширины листа, диаметра внутреннего (начального) витка и шага (расстояния между спиралями).

Необходимая поверхность нагрева (рис. 4-32, *а*) выражается формулой [Л. 43].

$$F = 2L_{\text{эфф}} S_{\text{эфф}}, \quad (4-1)$$

где $L_{\text{эфф}}$ — эффективная длина спирали от точек *т* и *п'* до точек *М* и *Ν* соответственно;

$S_{\text{эфф}}$ — эффективная ширина спиралей, равная $(S - 20)$ мм, где S — ширина листа.

При заданной ширине и толщине листа его длина определится с помощью формул (4-2) — (4-7), в которых приняты следующие обозначения (все величины принимаются в миллиметрах, посередине толщины листов спиралей):

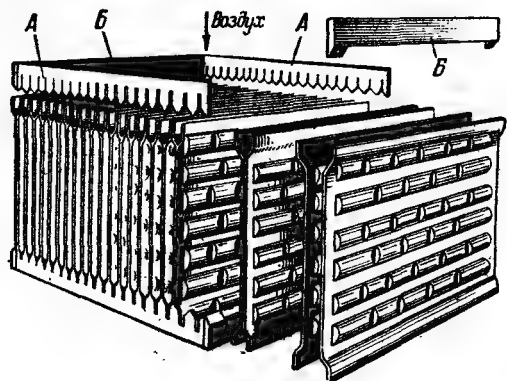
$t = c + \delta$ — шаг;

c — ширина канала;

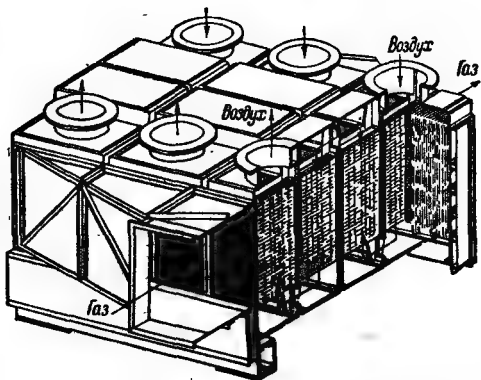
δ — толщина листа;

d — внутренний диаметр теплообменника;

a и *b* — конструктивные размеры;



a



б

Рис. 4-31. Пластиначый штампованный теплообменник.

a — сборка пакета; *б* — теплообменник в собранном виде.

Если расчетная длина спирали больше стандартной длины листов, то их сваривают до нужного размера или, если это возможно, заказывают листы нестандартной длины.

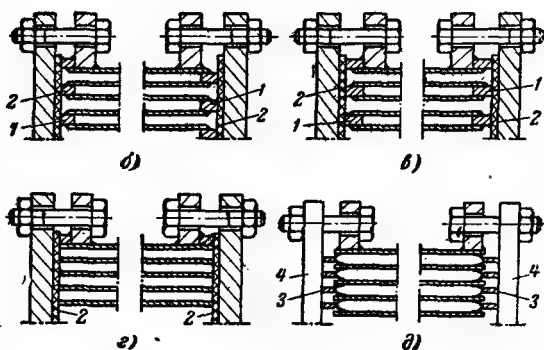
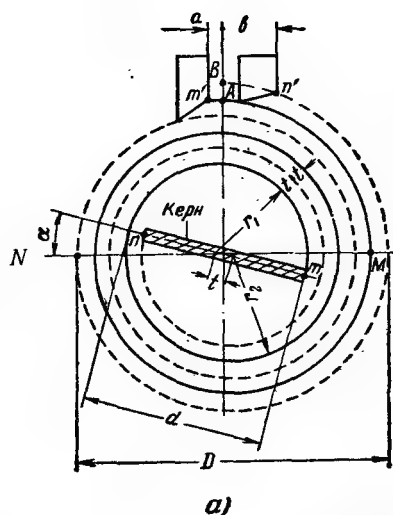


Рис. 4-32. Спиральный теплообменник.

а—схема к расчету спирали теплообменника; б—оба канала заварены с одной стороны; в—один из каналов заварен; г—уплотнение прокладками; д—уплотнение манжетками.

N_0 — округленное до целого четного числа суммарное число витков.

Число витков, необходимое для получения эффективной длины, определяется по формуле

$$n = \sqrt{\frac{L_{эфф}}{2\pi t} + \frac{1}{8} \left(\frac{d}{t} - 1 \right)^2} - \frac{1}{4} \left(\frac{d}{t} - 1 \right). \quad (4-2)$$

Число витков обеих спиралей

$$N = 2n = \sqrt{\frac{2L_{эфф}}{\pi t} + \left(\frac{d}{t} - 1 \right)^2} - \left(\frac{d}{t} - 1 \right). \quad (4-3)$$

Наружный диаметр спирали с учетом толщины листа определяется по формуле

$$D = d + 2Nt + \delta. \quad (4-4)$$

Действительные длины листов спиралей (между точками m и m' для спирали I и между точками n и n' для спирали II) определяются по формуле

$$L_I = L_{эфф} + \frac{1}{4} \pi D + a; \quad (4-5)$$

$$L_{II} = L_{эфф} + \frac{3}{4} \pi D - b. \quad (4-6)$$

Угол поворота внутренней перегородки-керна

$$\alpha = (N - N_0) 180^\circ. \quad (4-7)$$

Заготовленные с припуском на обработку кромок листы для спиралей правят и размечают, после чего обрабатывают кромки, сверлят и обтачивают отверстия под штуцера. Далее на нижнюю по положению при намотке сторону листа (на продольных кромках и по ширине) приваривают по разметке с шагом 80—200 мм фиксирующие расстояние между спиралями штифты, заготовленные из круглой стали диаметром 10—12 мм и высотой, соответствующей расстоянию между спиралями. После этого листы свертывают попарно в спирали на намоточном станке.

Каналы между спиралями уплотняют одним из следующих способов:

1. Каждый канал заваривают с одной стороны посредством вставной ленты (рис. 4-32,б). Такой способ уплотнения исключает возможность смещения теплоносителей при прорыве прокладок. Оба канала прочищаются при разборке. Этот способ уплотнения каналов распространен наиболее широко.

2. Один из каналов открыт с двух сторон, а второй с двух сторон заварен (рис. 4-32,в). Такой способ уплотнения применяют в тех случаях, когда теплообменник работает по принципу перекрестного тока или когда трудно подобрать прокладку, стойкую против действия одного из теплоносителей. Недостаток этого способа — невозможность прочистки заваренного канала.

3. Оба канала открыты с торцов (рис. 4-32,г). Открытые каналы, называемые сквозными, уплотняют с помощью прокладок, зажимаемых болтами между крышками и спиралями. Каналы прочищаются, но возможно смещение теплоносителей. Последнее обстоя-

тельство ограничивает область применения таких уплотнителей.

4. Каналы открыты с торцов (рис. 4-32,д). Прокладки между спиралями выполнены в виде манжет U-образного сечения, а крышка — из двух стальных спиральных полос, приваренных торцом к ребрам. Уплотнение создается давлением теплоносителей, поэтому способ пригоден только при постоянном избыточном давлении в аппарате. Оба канала очищаются, однако выполнение и сборка уплотнения сложны.

Изготовление прокатно-сварных теплообменников

Прокатно-сварные теплообменники представляют собой разновидность пластинчатых и сходны со штампованными аппаратами (рис. 1-12).

Система каналов для протекания теплоносителя или хладагента образуется между двумя алюминиевыми листами, сваренными между собой холодной или горячей прокаткой. Отжиг после холодной прокатки приводит к снятию наклепа в связи с рекристаллизацией металла, при этом происходят упрочнение сварного шва и частичное уничтожение границы сварки [Л. 4].

Для получения системы каналов заданной конфигурации между свариваемыми листами на поверхность одного из листов наносят до прокатки соответствующий этой системе рисунок краской, препятствующей сварке. В качестве трафарета для нанесения сложного рисунка каналов применяют печатные формы, изготовленные методом шелкографии. На шелковую сетку фотографическим путем наносят рисунок каналов, который пропускает краску; фон сетки краски не пропускает. Вследствие того, что при прокатке происходит вытяжка металла в одном направлении, поперечные линии рисунка наносят более тонкими в соответствии со степенью деформации. При прокатке поперечные каналы уширяются и становятся равными продольным.

В качестве исходной заготовки для испарителей к холодильникам, изготавливаемых этим методом, обычно применяют листы алюминия толщиной 3 мм. Поверхность листов тщательно зачищают металлическими щетками на станках, оборудованных столами с вакуумным пресом для удержания заготовки во время чистки. На свежезачищенную поверхность одного из листов краской наносят рисунок, после чего отпечаток высушивают в камерах инфракрасного излучения.

Далее на заготовку накладывают второй лист без рисунка. С помощью точечной электросварки листы сваривают в пакет. Затем пакет прокатывают в холодную под давлением $25-40 \text{ кг/см}^2$ с обжатием 65—75% за один проход; при этом пакет удлиняется в 3—4 раза.

После отжига прокатанный пакет раздувают водой под давлением 40—100 *ати* при за-

крытом одном конце канала между двумя плоскими штампами, расстояние между которыми определяет высоту каналов. В зависимости от степени раздутия можно изменять профиль канала от овального до прямоугольного с закругленными углами (рис. 1-12).

После гидравлического испытания при давлении 16 *ати* открывают второй конец канала для промывки и сушки.

Такой метод изготовления прокатно-сварных конденсаторов и испарителей для холодильников дает возможность получать аппараты с толщиной стенки 0,75—1 мм при ширине канала до 15—20 мм.

Изделия с каналами диаметром более 20 мм изготавливают из заготовки, в которой каналы получены путем отливки (с помощью стержней). Перед прокаткой их заполняют противосварочным порошком. При этом «трубы в листах» представляют собой систему параллельно расположенных незамкнутых каналов. При изготовлении испарителей из таких труб к каналам приваривают изогнутые трубы, образующие систему циркуляции теплоносителя или хладагента.

Промышленностью освоен выпуск прокатно-сварных теплообменников размерами до $356 \times 1200 \text{ мм}$.

Изготовление теплообменников для сверхвысоких давлений

В современной технике широко применяют теплообменные аппараты для работы при высоких и сверхвысоких давлениях. В тепловой энергетике получили развитие котельные агрегаты, паровые турбины и вспомогательное оборудование на давления более 100 *ати* и температуры выше 500°С. В синтезе аммиака из азота и водорода применяют автоклавы для работы под давлением от 200 до 1500 *ати* при температурах 250—500°С.

Котельные барабаны, теплообменники и автоклавы со стенками толщиной 70 мм и более изготавливают сварными из листового проката, ковано-сварными и цельноковаными.

Технология изготовления цельно-сварных толстостенных аппаратов не отличается от технологии изготовления обычных теплообменников.

Цельнокованные сосуды изготавливают из одного слитка, вес которого принимают с учетом отходов при по-

ковке и механической обработке. Слитки при температуре около 700°C подают в кузнечно-прессовый цех, где их дополнительно нагревают до температуры $1200\text{--}1250^{\circ}\text{C}$. Ковку заканчивают при температуре не ниже 800°C , так как при более низкой температуре в металле могут образоваться трещины и рванины.

Ковка толстостенных цилиндрических сосудов производится на гидравлических прессах мощностью до 15 тыс. т. После первого нагрева слиток округляют, обрубая его концы и осадкой увеличивают в диаметре. После второго нагрева до 1250°C заготовку подают под пресс для прошивки отверстия строго по центру. Полученную кольцевую заготовку снова подогревают до 1250°C и в несколько приемов расковывают на оправках до получения поковки нужной длины и диаметра. Если днища сосуда отковываются заодно с цилиндром, то концы поковки должны иметь утолщения.

Послековки заготовку подвергают высокому отпуску при $600\text{--}700^{\circ}\text{C}$ для снятия напряжения и смягчения металла перед механической обработкой.

Механическая обработка заготовки заключается в обточке внутренней и внешней поверхностей, а также обработке концов под крышки лавов. Кроме того, с обоих концов заготовки отрезают по кольцу, из которых вырезают образцы для испытания металла.

Обечайки ковано-сварных сосудов изготавливают по той же технологии, что и цельнокованные сосуды с последующей сваркой обечаек поперечными (кольцевыми) швами. Обычно ковано-сварные сосуды сваривают из нескольких отдельно откованных частей.

Сосуды из одного куска металла изготавливают также методом раскатки, основанном на отяжке нагретого до $1000\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ металла. Откованную и прошивную заготовку раскатывают на радиально-вальцовочном стане несколькими парами радиально расположенных роликов.

Широкого распространения такой способ изготовления толстостенных

обечаек не получил из-за сложности оборудования и высокой стоимости обработки.

На рис. 4-33 представлены конвертеры для синтеза аммиака при давлениях от 350 до 800 *ати* и температурах от 300 до 550°C , изготовленные заводом имени В. И. Ленина (Чехословакия). Корпус конвертера выполнен цельнокованным; фланцы отковывают вместе с корпусом или навинчивают в горячем состоянии на цельнокованный кожух. Корпус конвертера закрыт с концов коваными крышками, крепящимися с помощью болтов. Фланцы уплотняют прокладками из мягкой листовой меди или стальными литейными прокладками.

Для подвода и отвода жидкости или газа в крышках предусмотрены отверстия с фланцами для присоединения трубопроводов.

Корпус конвертера, фланцы, нарезные кольца, крышки, болты и гайки изготавливаются из легированной стали.

В химической промышленности применяют сосуды высокого давления с двухслойными и многослойными стенками с предварительным напряжением металла у внутренней стенки сосуда, что облегчает его конструкцию.

Для создания предварительного напряжения материала у внутренней стенки сосуда пользуются двумя способами.

Первый способ состоит в том, что на сердечник, представляющий собой трубу, накладывают в несколько слоев тонкие стальные листы полуцилиндрической формы, которые затем сваривают по образующим цилиндра. Сжатие при охлаждении сварных швов вызывает необходимое напряжение.

Второй способ состоит в том, что на сердечник, выполненный в виде трубы, наматывают по спирали профилированную стальную ленту. При соотношении диаметров до 1,2 и давлении 300 *ати* кованые и витые сосуды примерно равноценны; при соотношении диаметров от 1,2 до 2 витые сосуды выдерживают в 1,5 раза большее давление, чем кованые. Отходы при изготовлении витых сосудов составляют 5% вместо 50% при производстве кованых сосудов.

Витые сосуды изготавливают путем намотки в горячем состоянии на трубу-сердечник профилированных стальных полос шириной 50—80 мм и толщиной 5—8 мм — до необходимой толщины стенки сосуда. Шаг навивки равен ширине ленты. Стальные полосы профилируют прокаткой, их профиль имеет три выступа и три впадины, как это показано на рис. 4-34.

На трубе-сердечнике выступы и впадины протачивают так, чтобы лента при навивке плотно прилегала к сердечнику в углублениях. При навивке последующих лент выступы также должны входить в углубление, однако при этом витки последующего слоя сдвигаются относительно витков предыдущего слоя на $\frac{1}{3}$ ширины ленты, чем достигается полное перекрытие стыков. Так же выполняют фланцы сосуда;

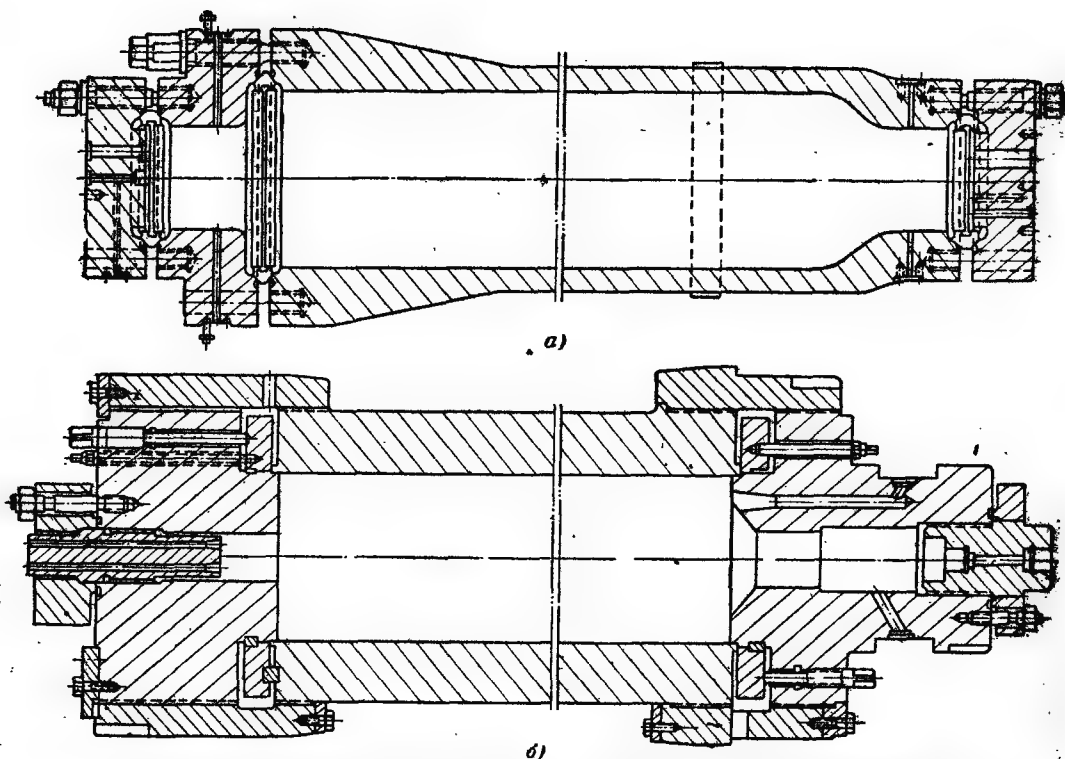


Рис. 4-33. Конвертеры для синтеза аммиака при давлениях 350 атм (а) и 800 атм (б).

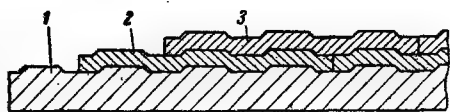


Рис. 4-34. Стенка витого сосуда.

1 — труба-сердечник; 2 — профилированная лента первого слоя; 3 — профилированная лента второго слоя.

применяя полосы со скошенной кромкой. По окончании навивки на концы сосуда насаживают бандажные кольца.

Затворы аппаратов высокого давления делятся на две группы: без самоуплотнения, когда

давление среды уменьшает давление между поверхностями уплотнения, и с самоуплотнением, когда давление среды способствует лучшей прилеганию поверхностей уплотнения.

В конструкции самоуплотняющихся затворов предусматривается уменьшение предварительного напряжения болтов в момент сборки и использование внутреннего давления среды для уплотнения мест разъема.

На рис. 4-35, а и б представлены уплотнения с кольцом треугольного сечения и самоуплотняющейся линзой, основанные на принципе пластической деформации под действием си-

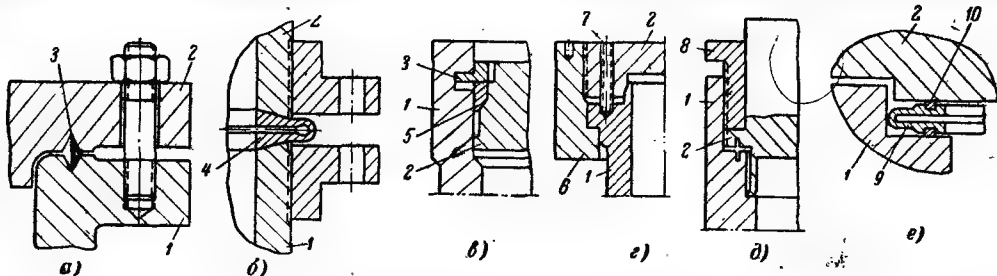


Рис. 4-35. Типы уплотнений высокого давления.

а — с кольцом; б — с линзой; в — с клиновидным obturatorом; г — с пружинящим кольцевым ободком на корпусе; д — с пружинящим кольцевым ободком на крышке; е — с уплотняющей манжетой. 1 — корпус аппарата; 2 — крышка затвора; 3 — кольцо; 4 — V-образная линза; 5 — obturator; 6 — стягивающая обойма; 7 — направляющий штифт; 8 — кольцевая гайка; 9 — U-образная манжета; 10 — прокладка.

лы стягивающих болтов и внутреннего давления среды. Недостаток этих затворов состоит в большой затрате времени на закрывание аппарата и необходимости больших сил для затягивания болтов.

Имеются конструкции самоуплотняющихся затворов, в которых для быстроты закрывания аппарата и снижения величины необходимой затягивающей силы используются:

1) высокая эластичность прокладочного материала;

2) уменьшение площади уплотняющей поверхности;

3) увеличение отношения силы в уплотнении к затягивающей силе путем выбора конфигурации уплотняемой поверхности;

4) действие давления внутри аппарата на уплотняющие детали затвора.

Показанное на рис. 4-35,а уплотнение для сосудов большого диаметра создается давлением крышки 2 на клиновидный зажим 5 между корпусом аппарата 1 и кольцом 3. Кольцо, состоящее из четырех частей, входит в специальный вырез в корпусе аппарата и работает на срез.

В быстродействующем затворе для сосудов малого диаметра, представленном на рис. 4-35,б, крышка 2 прижимается к корпусу 1 посредством обоймы 6. Обойма упирается одной стороной в заплечик корпуса аппарата, а другой навинчивается на его крышку. По внутренней стенке корпус заканчивается тонким кольцевым ободком. При затягивании обоймы 6 ободок деформируется вследствие нажатия на него крышки, имеющей конусообразный выступ, центрируемый с помощью направляющих штифтов 7.

На рис. 4-35,в представлен затвор, у которого крышка 2 имеет тонкий изогнутый ободок, упирающийся в выступ на внутренней поверхности корпуса 1. Под действием внутреннего давления ободок увеличивается в диаметре и прижимается к выступу корпуса. Соединение крышки с корпусом производится с помощью кольцевой гайки 8, наружная резьба которой ввинчивается в резьбу корпуса.

На рис. 4-35,г показан затвор с самоуплотняющейся линзой, имеющей U-образную форму, что позволяет линзе хорошо укладываться в выемке. Внутреннее давление в аппарате распирает линзу, прижимая ее к корпусу 1 и к крышке 2. Для создания хорошего уплотнения в края линзы впрессованы прокладки 10 из мягкого металла.

4-4. УГЛЕГРАФИТНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

В химической промышленности наряду с металлическими теплообменниками применяют теплообменники из неметаллических материалов.

Для изготовления таких теплообменников часто применяют углеграфитные материалы — пропитанный графит и графито-пласты.

Из графита изготавливают многие типы теплообменных аппаратов, выполняемых из металлических материалов, за исключением спиральных и змеевиковых. Так, из графита изготавливают кожухотрубные, пластинчатые и блочные теплообменники, теплообменники «труба в трубе», оросительные холодильники и абсорберы, печи синтеза хлористого водорода, выпарные аппараты.

Теплообменники из пропитанного графита имеют практически такой же коэффициент теплопередачи, как стальные теплообменники. Теплообменники из графитопластов имеют более низкий коэффициент теплопередачи. Все теплообменники из углеграфитовых материалов работают при сравнительно низких температурах 150—170°C и давлении от 2 до 5—10 атм. Теплообменники с двойными трубами и кожухотрубные изготавливаются поверхностью до 200—250 м², а пластинчатые теплообменники 10—20 м².

Кожухотрубные теплообменники. Теплообменники этого типа, изготовленные из углеграфитных материалов, очень компактны. В этом их существенное преимущество перед теплообменниками, выполненными из других неметаллических материалов.

По своей конструкции они аналогичны теплообменникам из металлических материалов.

Различают два типа кожухотрубных теплообменников из углеграфитных материалов:

1. Теплообменники, в которых из углеграфитного материала выполнены трубы, трубные доски и крышки, а кожух выполнен из стали. В этом случае должна предусматриваться возможность свободного теплового расширения графитных и стальных элементов, коэффициент расширения которых различен. Для этих целей применяют обычно сальниковые устройства или «плавающую головку». Такие теплообменники пригодны для процессов, в которых одна из сред

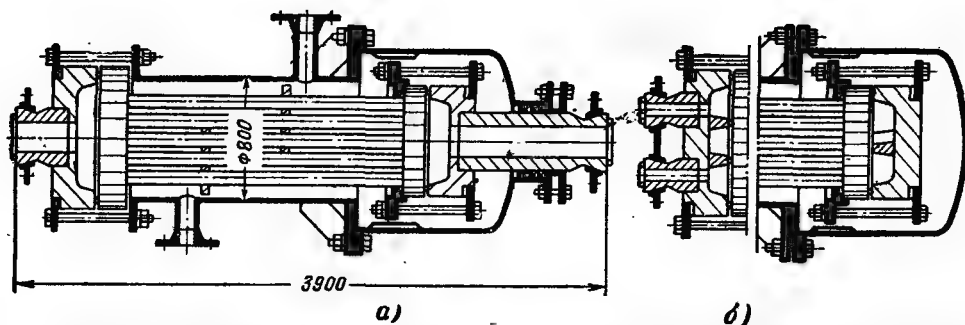


Рис. 4-36. Кожухотрубный графитный теплообменник со стальным кожухом и плавающей головкой.
а — одноходовой; б — двухходовой.

коррозионная, а вторая нейтральная, например, соляная кислота — водяной пар.

2. Теплообменники, полностью изготовленные из углеграфитных материалов. В этом случае применение компенсационных устройств не обязательно, и обе участвующие в теплообмене среды могут быть коррозионными.

По характеру движения теплоносителя в трубах различают теплообменники обычного типа со смешанными потоками и теплообменники с «падающей» пленкой. Последние характеризуются более интенсивным теплообменом и применяются во многих процессах, например абсорбции и конденсации соляной кислоты, конденсации и охлаждения органических и неорганических коррозионных продуктов, теплообмена между двумя коррозионно-активными средами.

На рис. 4-36 показан графитный кожухотрубный теплообменник со стальным кожухом и плавающей головкой. Эта конструкция применяется при необходимости изготовления теплообменников с большой поверхностью теплопередачи или в случае работы аппарата под вакуумом.

Длина труб в теплообменнике достигает 4 м. Длина теплообменника 5,2 м, диаметр 1200 мм, поверхность теплообмена — до 215 м², допустимое давление в аппарате — до 5 атм.

Кожухотрубный теплообменник, работающий по принципу падающей пленки, показан на рис. 4-37. Аппарат состоит из нескольких трубчатых элементов с поверхностью теплообмена 1,5 м² каждый, устанавливаемых один над другим. Число элементов в одном аппарате принимают от 2 до 10. В верхней части каждого элемента на концы труб устанавливают колпачки с прорезями, обеспечивающие образование пленки из жидкости, стекающей по внутренней поверхности трубок. Жидкость движется сверху вниз, проходя последовательно через все элементы аппарата. Второй теплоноситель поступает в межтрубное пространство последнего элемента и переходит из одного элемента в другой по соединительным каналам.

Тепловая компенсация в аппарате осуществляется с помощью металлических пружин, установленных под гайками металлических связей, стягивающих верхнюю и нижнюю крышки.

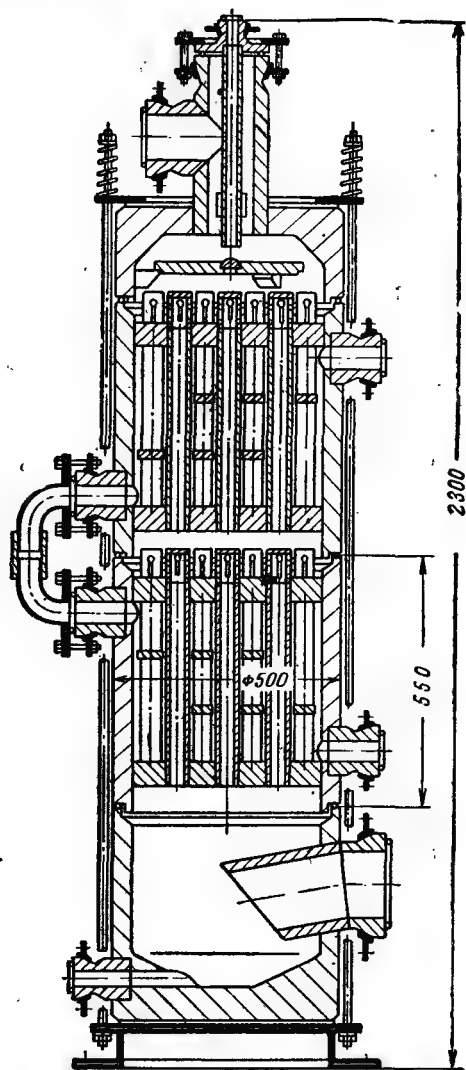


Рис. 4-37. Кожухотрубный графитный теплообменник с графитным кожухом.

Кожухотрубные теплообменники из графитных материалов должны иметь эластичные соединения с прижимающими к ним трубопроводами.

Пластинчатые теплообменники. Наиболее простая конструкция этого типа представляет собой ряд пластин из пропитанного графита, собранных в пакет с зазорами между пластинами от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Четные плиты соединены между собой патрубками с одной стороны пакета, а нечетные — с другой. С одной стороны каждой плиты проходит один теплоноситель, а с противоположной стороны — другой. Сборка пластинчатых теплообменников производится на клею, а пакет из плит посредством стальных щитов стягивается болтами.

Такие теплообменники применяют для абсорбции хлористого водорода, охлаждения соляной кислоты, для процессов конденсации и в других областях. Общий недостаток этих аппаратов — сложность ремонта.

На рис. 4-38 показан пластинчатый теплообменник из искусственного графита — диабона, изготовленный в ФРГ. Теплообменник собирается из графитных пластин, имеющих V-образные выемки. При складывании пластин эти выемки образуют каналы, по которым с каждой из сторон пластины движется жидкости, участвующие в теплообмене. С торцовых сторон пластин, собранных с помощью стяжных болтов и стальных крышек в пакет, присоединяются распределительные камеры.

Теплообменник может быть применен для процессов, в которых оба теплоносителя коррозионно-активны. Такие теплообменники прочны, просты по конструкции, имеют малые га-

бариты и допускают большие скорости движения теплоносителей, что обеспечивает высокий коэффициент теплопередачи.

Блочные теплообменники. К преимуществам этих аппаратов относится сравнительная простота изготовления. Аппараты могут быть собраны без применения замазок и клеев, они прочны и надежны в работе, легко разбираются и обеспечивают интенсивный теплообмен. Вследствие различной теплопроводности искусственного графита в продольном и радиальном направлениях, что объясняется его кристаллической структурой, в многоблочных теплообменниках максимальная теплопроводность достигается в плоскостях, параллельных плоскостям прессования. Блочные теплообменники изготавливают из цилиндрических и прямоугольных блоков.

Теплообменник из цилиндрических блоков показан на рис. 4-39. В блоках просверлены каналы малого диаметра (от 8 до 18 мм) в осевом и радиальном направлениях, в центре блока — отверстие большого диаметра по его оси. Теплообменник собирается из группы блоков, число которых зависит от величины поверхности теплообмена. Блоки устанавливаются один на другой с кольцевыми прокладками между ними, снаружи надевают стальной кожух, сверху и снизу устанавливают крышки из «графолита» и чугунные плиты, после чего весь комплект соединяют с помощью стальных стяжек, проходящих через отверстия в верхней и нижней чугунных плитах. Для компенсации теплового расширения, различного у графита и стали, предусмотрено сальниковое устройство между стальным кожухом и крайними графитными блоками, а также компенсационные пружины под болтами стальных стяжек. Для движения жидкости по радиальным каналам в центральном канале устроены перегородки из графолита, устанавливаемые после каждого четного блока, и перегородки из резины, устанавливаемые в наружном кольцевом канале после каждого нечетного блока (между графитными блоками и стальным кожухом).

Таким образом, жидкость, подаваемая через штуцер А в наружный кожух, проходит по радиальным каналам первого блока в центральный осевой канал, а из него по радиальным каналам второго блока в наружный кольцевой канал и далее по радиальным каналам третьего блока вновь в центральный осевой канал и далее вплоть до выходного штуцера.

Через штуцер С по осевым каналам движется второй коррозионно-активный теплоноситель, проходящий прямолинейно и последовательно через все блоки. По пути движения этого теплоносителя между отдельными блоками имеются камеры для турбулизации потока, образованные выточками с торцов каждого из блоков. Если обе жидкости, участвующие в те-

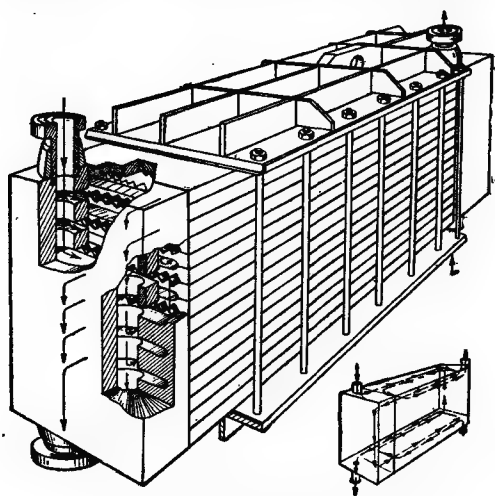


Рис. 4-38. Пластинчатый графитный теплообменник.

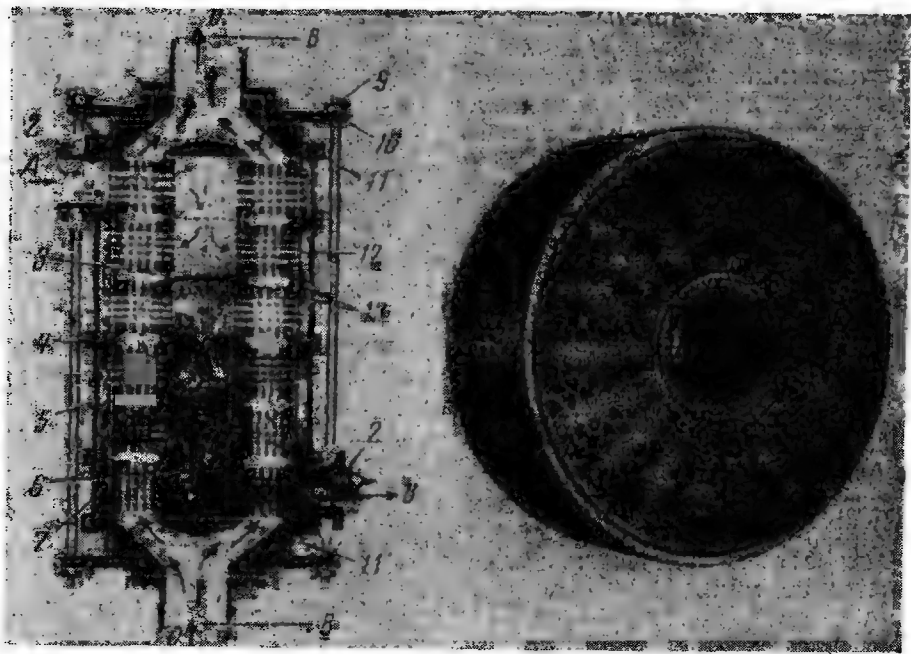


Рис. 4-39. Графитный теплообменник из круглых блоков.
а—общий вид; б—графитный блок,

плообмене, коррозионно-активны, наружный стальной кожух с внутренней стороны гуммируют или защищают другим материалом. На-

ружный кожух также можно изготовлять из графита.

Давление в аппарате допускается в пределах до 6 *ати*. Число блоков в одном аппарате от 2 до 20. Поверхность теплообмена аппарата изменяется в зависимости от числа блоков и их размеров и может достигать 42—50 м^2 . Общая высота аппарата из 20 блоков—около 2 400 *мм*.

На рис. 4-40 показан теплообменник из прямоугольных блоков. Такого типа теплообменники изготовляются Новочеркасским электродным заводом, а также зарубежными фирмами. Принципиально теплообменник не отличается от описанного выше.

Изготовление углеграфитовых изделий. Графит не сваривается, не вальцуется и не изгибается, однако в отличие от металлов хорошо склеивается и легче обрабатывается резанием. При изготовлении изделий из графита и графитопластов применяют различные способы обработки. В зависимости от назначения деталей и их конструкции используют комбинации графитовых деталей с деталями из других материалов, в том числе из металлов.

Крупные углеграфитовые детали изготовляют графитацией сформо-

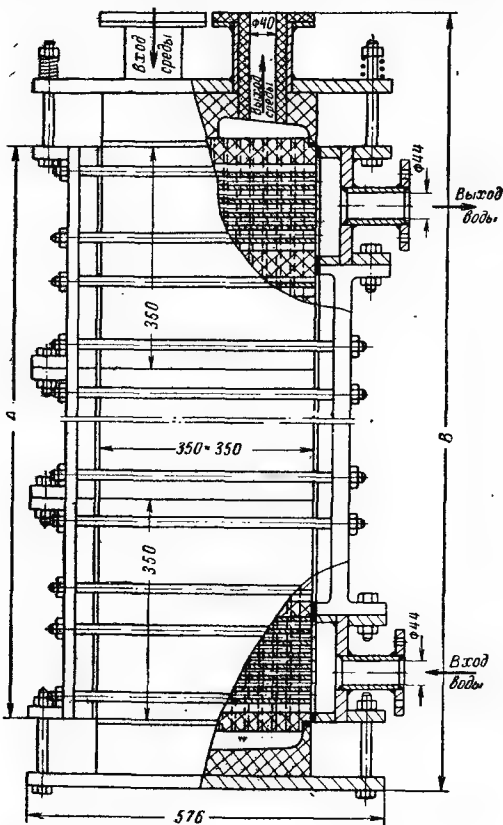


Рис. 4-40. Графитный теплообменник из прямоугольных блоков.

ванной угольной массы или вытячиванием из графитных блоков. Соединение таких деталей выполняют на резьбе, на клею или замазках, а также путем стягивания стальными болтами с применением стальных крышек, плит и фланцев.

Соединение и удлинение труб. Разъемное соединение труб производится на резьбе, а также с помощью фланцев и муфт (рис. 4-41).

Муфтовые соединения типов а и б применяют, например, при изготовлении теплообменников с графитными трубами, длина которых ограничена размерами графитных блоков, из которых трубы вытячиваются. Для непроницаемости резьбового соединения в качестве уплотнителя применяют замазку с повышенным содержанием жидких компонентов.

Прокладки изготовляют из материала, устойчивого в данной среде (резина, полиэтилен и др.).

Фланцевое жесткое соединение типа в применяется на трубопроводах, а также для присоединения трубопроводов к теплообменникам и другим аппаратам. Графитная муфта (кольцо) на конце трубы устанавливается на замазке или на клею, иногда с последующей термической обработкой. Металлические фланцы выполняют разъемными, из полуколец, прокладки — из пластичного материала.

На трубопроводах, работающих с вибрацией, либо в случаях, когда необходимо регулировать их длину, применяют гибкое соединение типа г. Уплотнительное кольцо или бурт на концах труб изготовляют из сырого фаолита и полимеризуют при высокой температуре в камере. Затвердевшую массу подвергают механической обработке. Наружное кольцо изготовляют из графита.

Неразъемные соединения труб из пропитанного графита и антегмита на графолите или фаолите применяют на длинных участках трубопроводов, которые не требуют разборки в процессе работы, а также в оросительных и воздушных теплообменниках. Края стыкуемых труб зачищают, между ними закладывают жгут из разогретой фаолитовой массы и накладывают ленты из разогретого фаолита, после чего соединение подвергают термиче-

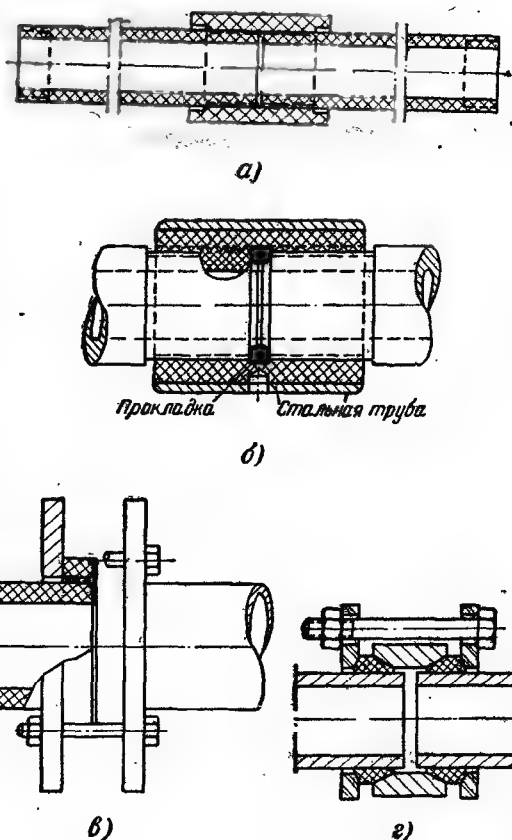


Рис. 4-41. Способы соединения труб из графита. а — муфтовое соединение; б — соединение бронированной муфтой; в — соединение с помощью графитных колец и металлических фланцев; г — гибкое фланцевое соединение с уплотнительным кольцом.

ской обработке с целью полимеризации фаолита. Такое соединение выдерживает гидравлическое испытание при давлении 2 атм.

Укрепление и уплотнение труб в трубных досках производятся клеем или замазкой. Последний способ крепления наиболее распространен. В качестве замазки может быть применен углеродистый цемент, изготовляемый в виде порошкообразного графита, перемешиваемого перед употреблением с отвердителем и жидкой смолой. Укрепленные таким образом трубы образуют жесткое крепление и могут быть легко заменены при повреждении. На одном из заводов в кожухотрубном теплообменнике трубы из антегмита (АТМ-1) крепились в фаолитовой трубной доске с помощью сырой фаолитовой массы или замазки арзамит с последующей полимеризацией.

4.5. УПЛОТНЕНИЕ ФЛАНЦЕВЫХ И САЛЬНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Прокладки. Герметичность разъемных фланцевых соединений достигается путем применения прокладок. Прокладки изготавливаются в виде колец вырубкой или вырезкой из картона, парусины, кожи, фибры, паранита, резины, пластмасс, металлов и других материалов, выбор которых зависит от свойств и параметров уплотняемой среды и условий работы аппарата.

Для давлений до 16 кг/см^2 применяют прокладки толщиной 2 мм , для более высоких — толщиной $0,5$ — $1,0 \text{ мм}$.

До постановки на место осмотру подвергается каждая прокладка. Не допускаются прокладки со следами излома, морщинами и трещинами. Прокладки не должны ломаться, трескаться и расслаиваться при изгибании на 180° вокруг стержня диаметром 12 мм для прокладок толщиной до 1 мм , 24 мм — от 1 до $1,24 \text{ мм}$ и 42 мм — от $1,25$ до $2,5 \text{ мм}$.

Прокладки из листовых материалов вырезаются, как правило, из одного куска материала. Для аппаратов больших диаметров иногда применяют прокладки, стыкованные косыми срезами по толщине прокладки на длине не менее 50 мм . Стыкование должно выполняться тщательно; утолщение прокладки в месте стыка не должно превышать 10% ее номинальной толщины.

Кроме листовых материалов, для изготовления прокладок применяют шнуровые материалы: плетеную пеньку, асбестовые и резиновые шнуры, стыкуемые также косым срезом.

Перечень основных материалов, применяемых для изготовления прокладок, приведен в табл. 4-15.

Герметичность фланцевого соединения определяется выбором прокладочного материала и формой (конструкцией) уплотнительных поверхностей.

Гладкая поверхность плоскостей фланцев допускается при давлении до 25 кг/см^2 , соединение «шип—паз» — до 100 кг/см^2 , а соединение «выступ—впадина» при стальных зубчатых прокладках — до 200 кг/см^2 .

В трубопроводах с давлением выше 50 атм применяются обычно сталь-

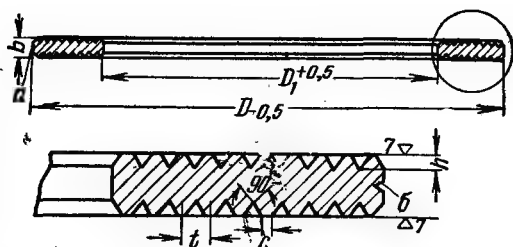


Рис. 4-42. Зубчатая прокладка для трубопровода высокого давления.

a — место маркировки; *b* — клиновидная риска шириной и глубиной $0,5 \text{ мм}$ только для прокладок из стали Х18Н9Т.

ные зубчатые и линзовые прокладки (рис. 4-42 и 4-43).

Твердость стальных прокладок должна быть не больше 120 — 130 по Бринеллю, для чего их заготовки должны проходить термическую обработку (нормализацию).

При подготовке металлических прокладок к монтажу их поверхность осматривают с помощью лупы, чтобы установить отсутствие трещин, срывов, заусенцев и т. д. Кроме того, зубчатые прокладки проверяют по контрольной плите, а линзовые — по сферическому шаблону.

Разница в толщине металлической прокладки не должна превышать $0,1 \text{ мм}$. При изготовлении зубчатых прокладок на монтаже можно применять сталь марок Ст. 2 и Ст. 3 по ГОСТ 380-60 с предварительной термической обработкой.

Для изготовления линзовых прокладок можно применять отрезки соответствующих по размеру труб высокого давления. Отрезки разрезают, выпрямляют в лист, термически обрабатывают его и вырезают заготовку для проточки на станке. В табл. 4-16 и 4-17 приведены основные размеры зубчатых и линзовых прокладок.

Сальниковые уплотнения. При значительных термических изме-

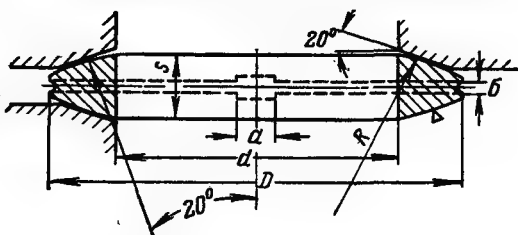


Рис. 4-43. Линзовая прокладка.

a — место маркировки; *b* — канавка для захвата прокладки проволокой.

Прокладки для фланцевых соединений теплообменников и трубопроводов низкого, среднего и высокого давлений

Прокладочные материалы	Предельное рабочее давление, атм	Предельная температура, °С	Толщина прокладки, мм	Примечание
Для воды				
Парусина	1,5	50	0,3—0,6	Ставится на белилах или сурике То же. Длинноволокнистая высоко- сортная, в виде сплетенных плоских колец, ОСТ/НКЛП 1809
Пенька	3,0	40	2—6	
Кожа	3,0	40	1,5—3	До диаметра 500 мм. Не должна тре- скаться при огибании вокруг оправ- ки диаметром, равным двойной тол- щине листа. ТУ 233-54р
Резина сплошная	3,0	40	4—6	
Резина с парусиновой про- кладкой	6,0	60	3	ГОСТ 6877-54. Предварительно пропи- тывается в горячем масле
Картон технический	16,0	120	0,2—3	
Паста „Феникс“	25	200	До 5	Применяется в виде притовленной ленты или накладывается на метал- лическую сетку
Паранит У и УВ	40	375	0,3—6	ГОСТ 481-58. Размеры листов от 300×400 до 1 200×1 500 мм
Паранит УВ-10 (вулканизи- рованный)	40	375	1,5—3	ТУ В69-50р
Малоуглеродистая (мягкая) сталь	50	Не огра- ничена	3—4	Гофрированные или гребенчатые (см. стр. 168) ГОСТ 1050-60
Никель	100	—	—	Гребенчатые
Сталь марки 1Х13	250	Не огра- ничена	3—4	Зубчатые или линзовые (рис. 4-42 и 4-43)
Для пара				
Асбест листовой АС	1,5	600	До 12	ГОСТ 2850-58. Размеры листов до 1 000 мм
Асбест шиуровой сухой	1,5	600	3—25	Прокладки толщиной более 4 мм ста- вить не рекомендуется
Паста „Феникс“	15	200	До 5	ГОСТ 1779-55. Выпускается квадрат- ного и круглого сечения скручива- нием отдельных нитей, содержащих примесь хлопка
Паранит	40	375	0,3—2	
Паранит У	50	450	0,3—2	См. прокладки для воды
Картон латексный	50	425	1—2	
Паранит УВ	60	425	1—2	ТУ 1369-50р
Мягкая сталь	100	500	До 3	Гофрированные
Сталь марки Х18Н9Т	300	510	До 4	Зубчатые и линзовые (см. стр. 168) ГОСТ 7350-55
Для нефтепродуктов				
Картон технический	10	30	0,2—3	ТУ/ПО НКХП 233-Н
Бумага чертежная	10	80	0,2—0,3	ОСТ 3022. Для маслопродуктов про- питывается маслом; для нефтепро- дуктов—керосином или бензином
Фибра	15	80	1—1,5	ТУ НКБЛ 21 и 34-41
Паранит УВ маслоупорный	75	350	1—1,5	—
Для агрессивных сред				
Резина кислотощелочестой- кая 1-й группы	6	50	3—6	ТУ 233-54р
Целлюлоза	6	80	1—3	Пропитывается водой
Полиизобутилен	—	40	1—3	—
Полихлорвиниловый пласти- кат	6	60	1—3	ТУМХП 2024-49
Текстолит МА	25	100	1—3	ТУМХП 488-50
Фторопласт-4	25	250	1—3	ТУМ 162-54
Свинец	6	140	2—3	ГОСТ 3778-56
Алюминий	25	150	1—3	ГОСТ 3549-55

Таблица 4-16

Прокладки стальные зубчатые (рис. 4-42)

Условный проход D_y , мм	Размеры, мм						Количество зубцов n
	D	D_1	b	h	t	c	
15	28	16	3	0,65	1,5	0,2	4
20	35	23	3	0,65	1,5	0,2	4
32	50	35	3	0,65	1,5	0,2	5
60	85	62	3	0,65	1,5	0,2	8
80	116	89	3	0,65	1,5	0,2	9
100	138	106	4	0,85	2,0	0,3	8
125	170	134	4	0,85	2,0	0,3	9
150	190	154	4	0,85	2,0	0,3	9
175	214	174	4	0,85	2,0	0,3	10
200	245	197	4	0,85	2,0	0,3	12
225	268	220	4	0,85	2,0	0,3	12
250	319	263	4	0,85	2,0	0,3	14

нениях длины труб в теплообменных аппаратах применяют сальниковое соединение одной из трубных досок с аппаратом или сальниковое крепление труб в трубных досках. Сальниковые уплотнения применяют также для предотвращения просачивания среды через зазоры, образуемые вращающимися деталями и удерживающими их элементами аппарата (шток и крышка в запорной арматуре, мешалка и корпус в химическом реакторе и т. д.).

Таблица 4-17

Прокладки линзовые для высокого давления (рис. 4-43)

Условный проход D_y , мм	Размеры, мм							
	Условное давление 100—250 атм				Условное давление 320—400 атм			
	D	d	s	R	D	d	s	R
10	19	10	7,5	18,6	19	10	7,5	18,6
15	26	15	7,5	28	26	15	7,5	28
20	32	20	8	35	32	20	8	35
25	37	25	9	40	37	25	9	40
32	48	32	10	53	48	32	10	53
40	58	40	11	65	58	40	11	65
50	70	50	13	80	70	50	13	80
80	108	80	18	130	114	80	20	132
100	140	102	20	165	152	102	25	169
125	170	128	25	208	190	128	30	218
150	215	153	32	247	225	153	35	248
175	236	178	32	285	252	178	38	288
200	270	205	35	316	282	205	40	330
225	298	230	38	362	312	230	43	369
250	325	255	40	405	340	255	45	410
300	375	305	45	410	—	—	—	—

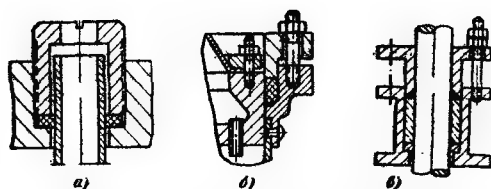


Рис. 4-44. Сальниковые уплотнения.

а — трубка в трубной доске; б — трубная доска в корпусе; в — шток в вентиле.

Сальниковое устройство состоит из корпуса и нажимной втулки (рис. 4-44), которой зажимается мягкая набивка, располагаемая вокруг детали, имеющей свободу поступательного или вращательного движения.

Материалом для сальниковых набивок служат хлопчатобумажные и асбестовые волокна, графит и мягкие сорта металлов.

К сальниковым материалам предъявляют следующие основные требования: высокая стойкость против воздействия среды при соответствующих температурах и давлениях; отсутствие под их воздействием следов механического износа на уплотняемых поверхностях; устойчивая эластичность и химическая инертность по отношению к уплотнительному устройству.

Ниже приведены основные виды набивок и способы их приготовления:

1. Асбестовая сухая и асбестовая просаленная набивка представляют собой плетёный шнур из асбестовой нити. Набивки бывают с одним и с несколькими оплетениями, а также насквозь оплетённые круглого и квадратного сечения размером от 4 до 50 мм. Поверхность набивки должна быть гладкой, не липкой, без выступающих оборванных нитей. Набивки не должны расслаиваться и выпучиваться при изгибании на 180° при оправке: диаметром 75 мм — для набивок размером 19 мм и 150 мм — размером 22 мм и более.

Вес 1 см³ сухой набивки — не более 1,1 г, просаленной — не более 1,5 г.

2. Пеньковая сухая и пеньковая просаленная набивка выполняется из пеньковой или джутовой пряжи с одним или несколькими оплетениями, а также насквозь оплетённые круглого и квадратного сечения размером

Набивочный материал для теплообменников, арматуры и трубопроводов

Характеристика набивки	Рабочая среда	Предельные		Форма сечения	Изготавливаемые размеры, мм	Стандарты, преискурранты или технические условия
		давление, кг/см ²	температура, °С			
Пеньковая просаленная	Вода холодная и горячая	160	100	Квадратная и круглая	6, 8, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 32, 35, 38, 42, 45 и 50 Те же.	ст 18 Главрезина 2059
Пеньковая тальковая графитированная „Универсаль“	Та же	3	130	Та же	Те же.	Применяемые льны: лен стланец ОСТ 8446, лен моченец ОСТ 8447, лен заводской обработки ОСТ 8887
Льняная просаленная „Нептун“	„ „	160	100	„ „	„ „	—
Хлопчатобумажная	„ „	200	100	„ „	„ „	—
Асбестовая просаленная „Специаль“	Горячая вода и насыщенный пар	25	300	„ „	4 и те же	ст 18 Главрезина 2061
Асбестовая сухая	То же	25	500	„ „	„	ст 18 Главрезина 2058
Асбестовая просаленная с графитом и медной проволокой „Рациональ“	Перегретый пар	45	400	Квадратная	От 6 до 38	ТУ Асбестового завода
Асбестовая просаленная с графитом, медной и свинцовой проволокой „Циклон“	То же	65	500	Та же	—	—
Коллоидальный графит	„ „	140	510	—	—	ГОСТ 4596-49
Пеньковая просаленная черная	Минеральные масла, нефть	65	100	Квадратная и круглая	От 6 до 50	П. к. № 55530
Свинец	Кислоты	1,5	—	—	—	—
Асбестовая, пропитанная минеральным маслом с графитом	Перегретый пар, слабые растворы кислот, щелочей, газы	—	—	—	—	—
„Термопласт“						

от 4 до 64 мм. Вес 1 см³ сухой набивки — не более 0,9 г, просаленной — не менее 0,9 г.

3. Бумажная набивка изготавливается из хлопчатобумажной пряжи. По форме, роду плетения, размерам и внешнему виду она не отличается от асбестовых набивок. Вес 1 см³ сухой набивки 0,45—0,8 г, просаленной 0,9—1,3 г.

4. Набивка «термопласт» изготавливается из асбестового волокна, пропитанного минеральными маслами с графитом.

«Термопласт» набивают в хорошо очищенный и охлажденный сальник в два приема: вначале наполняют сальник до половины, затем после его работы в течение 10—12 ч напол-

няют оставшееся свободное пространство. Сильно затягивать болты сальников не рекомендуется. В глубоких сальниках и при больших зазорах между штоком и корпусом сальника применяют набивку «термопласт» в комбинации с плетеными набивками. В сальник укладывают один-два витка плетеной набивки, а остальное пространство наполняют «термопластом»; сверху укладывают кольцо из плетеной набивки.

5. Набивка марки «Нептун» изготавливается из длиноволокнистого льна и пропитывается вискозином или нигролом с графитовой пылью.

6. Набивка марки «Рациональ» выполняется в виде плетеного из асбестовой пряжи шнура с медной

проволокой; шнур пропитывается антифрикционной массой и прографичивается. Набивки изготавливаются с несколькими оплетениями и насквозь плетеные. Требования к эластичности те же, что и для асбестовой набивки.

7. Асбестографитовая набивка для высоких давлений. Чистый асбестовый шнур расплетается на пряди диаметром 3—5 мм, из которых сплетается плотный шнур квадратного сечения по размерам сальника. Готовый шнур натирают серебристым сухим графитом и разрезают по размеру сальника на кольца с косым срезом. Готовые кольца закладывают в сальник, а между ними насыпают слой сухого серебристого графита толщиной 3—5 мм. Кольца и графит при укладке уплотняют сальниковой втулкой через вспомогательные стальные полукольца.

8. Графитовая набивка. По гнезду сальника изготавливают два асбестовых кольца, одно из которых укладывают в гнездо, затем в несколько приемов засыпают сухой серебристый графит, который обжимается с необходимой добавкой; затем сверху укладывают второе асбестовое кольцо и сальник затягивают.

9. Уплотнительные пасты ВНИИГС (ВНИИ гигиены и санитарии). Их состав: окисленный жир морских животных или рыб, негашеная известь и графит. Эти пасты применяют для уплотнения резьбовых соединений водопроводов холодной и горячей воды, паропроводов, газопроводов бытового газа. Пасты заменяют уплотнители из свинцового сурика и натуральной олифы.

С течением времени пасты ВНИИГС затвердевают и становятся непригодными для нанесения их на резьбовые соединения, поэтому их следует готовить в количестве, соответствующем одно- или двухсуточному расходу.

10. Фторопласт-4. Набивка из фторопласта-4 может применяться в виде сплошных или разрезных колец, изготовленных по размеру сальникового гнезда, или в виде жгутов, состоящих из свернутой тонкой ленты. По данным НИИХИММАШ уплотнение из фторопласта-4 при стойкой смазке может применяться при температурах от минус 195 до +250°С при давлениях до 100 кг/см². Срок службы фторопласта-4 в 20—30 раз больше, чем обычных мягких набивок.

ГЛАВА ПЯТАЯ

МОНТАЖ, ИСПЫТАНИЕ И ПРИЕМКА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

5-1. СБОРКА ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Сборка теплообменников на заводе-изготовителе до поступления к месту монтажа необходима для подгонки и выверки деталей, а также гидравлического испытания аппарата.

Детали и узлы аппарата, подготовленные к сборке, направляют после прохождения технического контроля на монтажный участок. Технологическая схема сборки может быть основана на операциях сборки как отдельных деталей, так и мелких и укрупненных узлов. Сборка изделия из укрупненных узлов обеспечивает точность и высокую производительность сборки, хорошее использование площадей и подъемно-транспортных механизмов.

Для удобства сборочных работ и соответствия сборки аппарата технологической карте детали и узлы маркируют условными обозначениями по порядку их поступления.

Для сокращения сроков сборки и повышения производительности труда необходимо: оборудовать участок подъемно-транспортными устройствами, разработать приспособления для вращения, кантовки, зажимания, упора, прихватки, измерения, контроля и испытания узлов и изделия, иметь необходимые электрические и пневматические инструменты.

В качестве примера ниже приведена технологическая схема изготовления элемента теплообменника типа «труба в трубе» [Л. 45] (рис. 5-1). Спецификация основных узлов и деталей теплообменника дана в табл. 5-1.

Спецификация к рис. 5-1

Позиции	Наименование детали	Материал (марки стали)	Количество на одно изделие, шт.	Позиции	Наименование детали	Материал (марки стали)	Количество на одно изделие, шт.
1	Фланец $\varnothing 220 \times 110$ мм	1X18H9T	1	6	Труба $\varnothing 25 \times 2,5$ мм	20	2
2	Кольцо	1X18H9T	2	7	Труба $\varnothing 108 \times 5$ мм	1X18H9T	1
3	Подкатанная труба	20	2	8	Линзовый компенсатор	Ст. 3	2
4	Фланец $\varnothing 105 \times 25$ мм	Ст. 3	2	9	Перья	1X18H9T	9
5	Труба $\varnothing 159 \times 4,5$ мм	20	1	10	Труба $\varnothing 57 \times 3,5$ мм	20	2
				11	Фланец $\varnothing 160 \times 58$ мм	Ст. 3	2
				12	Фланец $\varnothing 220 \times 110$ мм	1X18H9T	1

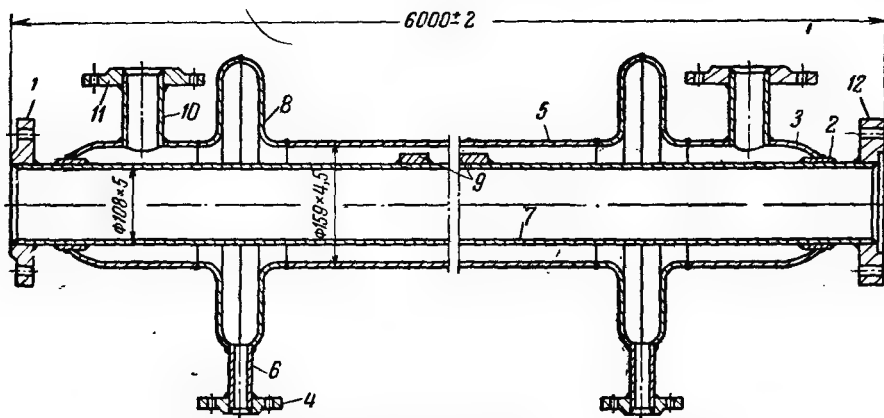


Рис. 5-1. Элемент теплообменника типа „труба в трубе“.

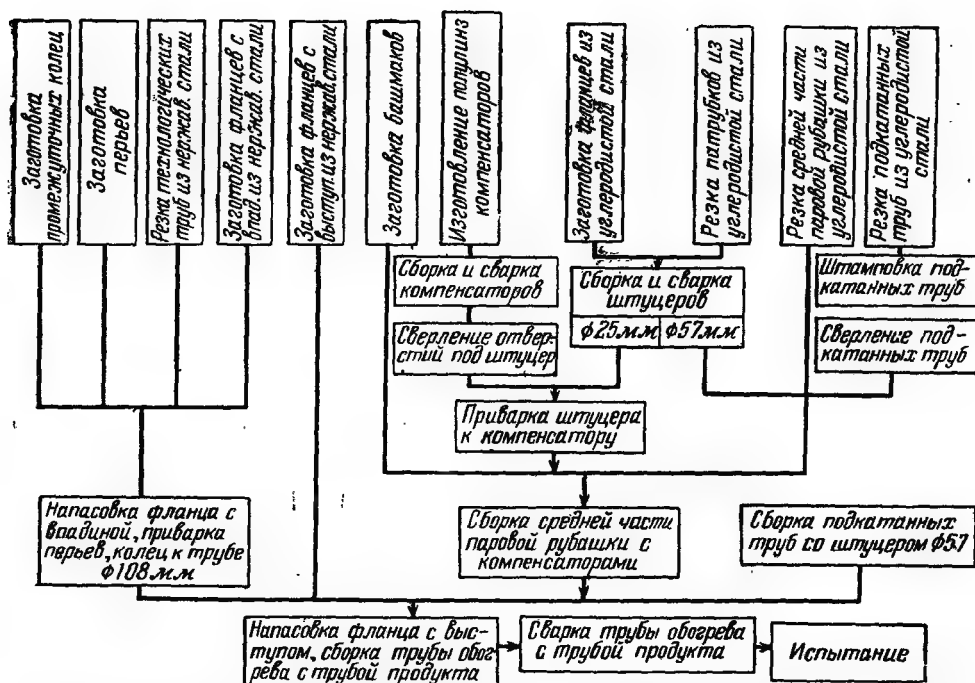


Рис. 5-2. Технологическая схема изготовления теплообменника „труба в трубе“.

Из представленной на рис. 5-2 технологической схемы теплообменника типа «труба в трубе» собирается на сборочном участке как из отдельных деталей, так и из узлов.

Заготовка металла. После приемки по сертификатам на заготовительный участок поступают со склада прокат и трубы следующих марок и размеров:

1. Листовая высоколегированная сталь марки IX18H9T толщиной 28 мм для изготовления фланцев к внутренним трубам (поз. 7) и калачам.

2. Листовая углеродистая сталь марки Ст.3 толщиной 16 и 20 мм для изготовления фланцев к штуцерам наружной трубы (поз. 4 и 11).

3. Листовая углеродистая сталь марки Ст. 3 толщиной 4 и 6 мм для изготовления линзовых компенсаторов (поз. 8) и опор.

4. Трубы из стали IX18H9T диаметром 108×5 мм для изготовления внутренних труб (поз. 7), калачей и промежуточных колец (поз. 2).

5. Трубы из углеродистой стали диаметром $159 \times 4,4$ мм для изготовления наружных труб (поз. 3 и 6).

6. Трубы из углеродистой стали диаметром $57 \times 3,5$ и $25 \times 2,5$ мм для изготовления штуцеров (поз. 5 и 10).

На заготовительном участке листовой материал и трубы разрезают на мерные заготовки, правят и размечают, после чего они поступают на последующую обработку.

Заготовки для внутренней трубы из стали IX18H9T нарезают по размеченным размерам на трубоотрезном станке. Промежуточные кольца (поз. 2) изготавливают из тех же труб отрезкой по размеру с последующим расширением их на гидравлическом прессе.

Фланцы для внутренних труб вырезают кислородно-флюсовым резаком. На токарном станке на фланцах обрабатывают плоскости, внутренний и наружный диаметры, а также вытачивают выступ (в одном фланце) и впадину (в другом) для прокладки. Планировку

торца выступа производят после приварки его к трубе.

Отверстия под болты во фланцах сверлят по кондуктору.

Заготовку для наружных труб (рубашек) изготавливают из труб углеродистой стали. Для этого на трубоотрезном или токарном станке нарезают трубы для деталей поз. 3 и 6 и обрабатывают кромки под сварку.

На прессе с помощью штампа обжимают один конец трубы (поз. 3) и на токарном станке вырезают в нем отверстия под штуцер. Штуцера заготавливают по общепринятой технологии. Напасовку фланца на патрубки, их прихватку и приварку к наружной трубе производят в приспособлениях, обеспечивающих строгую перпендикулярность осей трубы и штуцера.

Опоры аппарата штампуют из листовой углеродистой стали и в виде заготовок передают на сборочно-сварочный участок.

Заготовки для линзовых компенсаторов вырезают из листовой углеродистой стали толщиной 4 мм при помощи газового резака или на прессе. Вырезанные диски отжигают и смазывают консистентной смазкой. Двумя последующими операциями их отбортовывают на прессе по наружной и внутренней кромкам.

Для придания половинкам линз нужных размеров и для образования фасок под сварку их обрабатывают на токарном станке. Затем обезжиренные в каустике полулинзы промывают водой и передают на сборку методом электросварки. После сварки двух половинок в линзах рассверливают отверстия под штуцер и приваривают к ним заготовленные штуцера (рис. 5-2 поз. 4 и 5).

Отдел технического контроля (ОТК) производит наружный осмотр готовых линз; одну десятую часть линз проверяют на компенсирующую способность по техническим условиям.

Сборка теплообменника. После прохождения технического контроля трубные заготовки, фланцы, компенсаторы, опоры и другие части

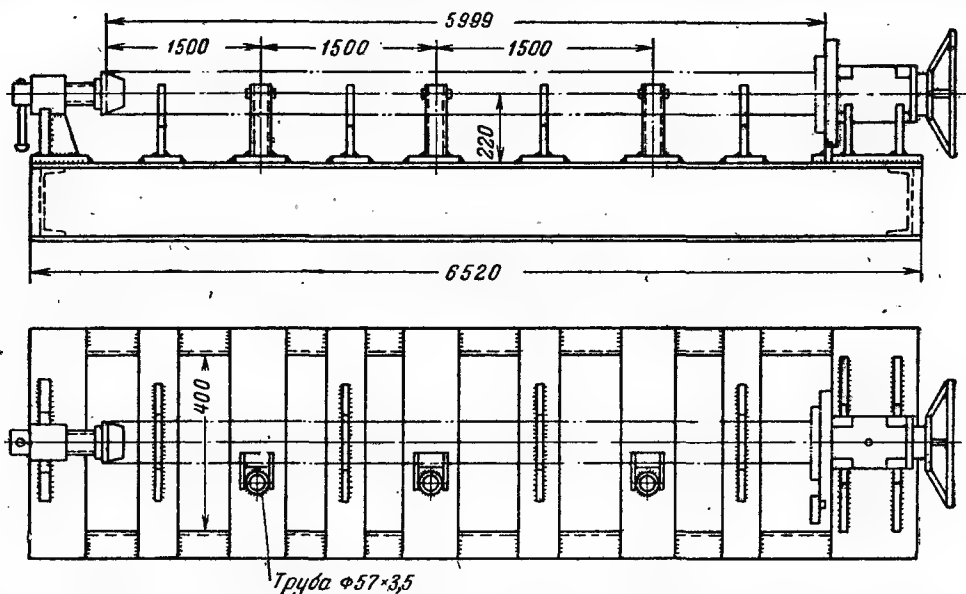


Рис. 5-3. Стенд для предварительной сборки деталей теплообменника «труба в трубе».

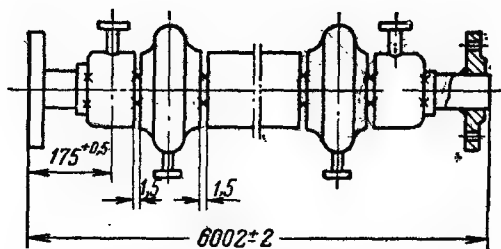


Рис. 5-4. Сборка деталей и узлов элемента теплообменника «труба в трубе».

аппарата направляют в определенной последовательности на сборочно-сварочный участок. Сборочные стенды должны быть обеспечены приспособлениями и кондукторами, позволяющими выполнять сборку и прихватку монтируемых деталей аппарата «труба в трубе» без применения линейных измерений.

Последовательность сборки и прихватки деталей аппарата примерно следующая:

1. Устанавливают и прихватывают к внутренней трубе (поз. 7) первый фланец (поз. 12), представляющий собой одновременно базовую деталь на стенде-кондукторе (рис. 5-3). После сварки трубу с одним фланцем обрабатывают на токарном станке для окончательной доводки плоскости фланца, имеющего впадину.

2. Трубу с фланцем возвращают на стенд-кондуктор, где к ней приваривают промежуточные кольца (поз. 2).

3. На трубу (поз. 7) надевают переходный конец наружной трубы-рубашки (поз. 3), после чего к внутренней трубе приваривают распоры (поз. 9).

4. Собирают среднюю часть наружной трубы (поз. 6) с линзовыми компенсаторами (поз. 8) и концевыми башмаками (поз. 3, 10 и 11) и прихватывают их электросваркой.

5. Собирают узел внутренней трубы с частью наружной трубы на специальном стенде. После напасовки второго фланца на внутреннюю трубу выверяют зазоры и прихватывают все детали и узлы электросваркой (рис. 5-4).

6. Собранный аппарат передают на сварочный стенд (рис. 5-5) для наложения швов на все стыкуемые узлы и детали.

7. После сварки аппарат подают на токарный станок для окончательной планировки второго фланца (поз. 1).

8. Осматривают собранный аппарат персоналом отдела технического контроля, проводят гамма-просвечивание и гидравлическое испытание.

Выдержавший испытание аппарат маркируют, окрашивают, устанавливают временные заглушки и направляют его на склад готовой продукции.

Данные об изготовлении и испытании заносят в паспорт аппарата и специальный регистрационный журнал, хранящийся на заводе-изготовителе.

Аппарат, подведомственный Госгортехнадзору, должен иметь наглухо прикрепленную на видном месте его лицевой стороны металлическую пластинку с обозначением:

- 1) завода-изготовителя аппарата;
- 2) номера аппарата по списку завода-изготовителя;
- 3) года изготовления аппарата;
- 4) наибольшего рабочего давления;
- 5) наибольшей температуры стенки, если она превышает 250°C ;
- 6) регистрационного номера местной Инспекции Госгортехнадзора (выбивается владельцем сосуда).

Помимо прикрепления к аппарату указанной пластины, завод-изготовитель должен выбить на наиболее массивной части аппарата — штуцере, фланце или других элементах — клейма, содержащие данные пп. 1—4.

5-2. МОНТАЖ ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ

Организация монтажно-сборочных работ

Монтаж теплообменной аппаратуры производится ремонтно-монтажными бригадами предприятия или специализированными организациями.

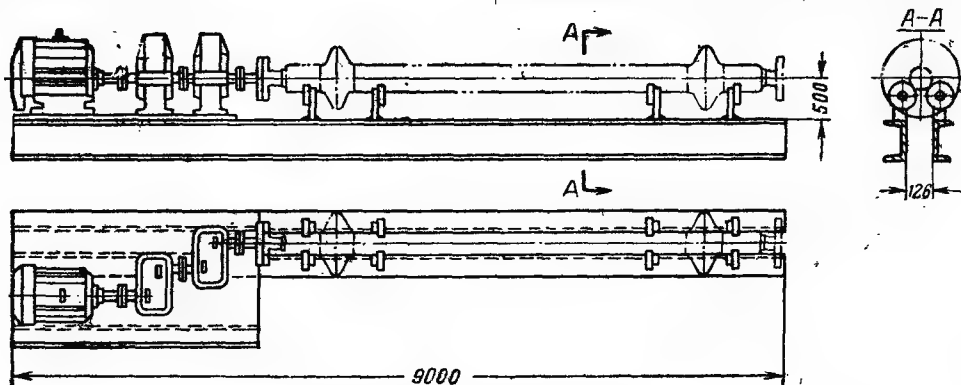


Рис. 5-5. Сварочный стенд.

Монтаж сложного оборудования и крупные ремонты должны производиться по проекту ремонтно-монтажных работ, включающему:

- 1) данные об объеме работ;
- 2) данные о способе ведения работ и их последовательности;
- 3) расчет потребности в такелажном инструменте, оборудовании и материалах;
- 4) расчет потребности в рабочей силе;
- 5) инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.

Приемка, хранение оборудования и подготовительные работы должны обеспечивать технически целесообразное экономное и высокопроизводительное ведение монтажа.

Теплообменная аппаратура, поступающая с завода-изготовителя, тщательно проверяется и принимается в соответствии с технической документацией, включающей паспорт, книгу Госгортехнадзора, инструкцию по монтажу и эксплуатации, перечень запасных частей и инструмента, а также рабочие чертежи запасных и быстросъёмных частей.

Оборудование, предназначенное для хранения, после очистки от грязи и масла и тщательного осмотра распределяют на четыре группы:

1-я — оборудование, портящееся от атмосферных осадков и требующее хранения в теплых закрытых складах: регуляторы, контрольно-измерительные приборы, щиты управления, аппаратура автоматического регулирования, эмалированные, гуммированные и футерованные детали;

2-я — оборудование, реагирующее на воздействие атмосферных осадков и сырости, но допускающее хранение в закрытых холодных помещениях: аппараты и детали из цветных металлов, арматура, детали трубопроводов, редукторы, мешалки, шнеки, моторы и т. п.;

3-я — оборудование, реагирующее на воздействие осадков, но допускающее хранение под навесом, в условиях переменной влажности и температуры: стальные теплообменники, барабаны и крышки, топочные механизмы, лестницы и площадки, гарнитура;

4-я — оборудование, которое может храниться на открытых площад-

ках — громоздкая чугунная и стальная аппаратура, металлические конструкции, стальные и чугунные трубы больших диаметров и т. п.

Для предохранения оборудования от атмосферной коррозии все части аппаратуры и механизмов следует покрыть масляной краской или лаком, а детали или части, не подлежащие окраске, — густым слоем консистентной смазки и обертывать плотной бумагой или тканью (шейки валов, вкладыши подшипников и т. п.).

На поступившее для хранения оборудование заводятся карточки, необходимые для строгого учета, периодичности 2—3 раза в год.

Перед началом монтажа проводят вспомогательные мероприятия: планировочные и дорожные работы, прокладку вспомогательных трубопроводов и электрического кабеля, установку приспособлений, монтажного и такелажного инструмента.

Монтаж теплообменников

Теплообменные аппараты доставляются заводом-поставщиком к месту монтажа, как правило, в собранном виде, за исключением аппаратов, превышающих транспортные габариты. Сборочные работы на монтаже заключаются в установке аппаратов на фундаменты, установке и присоединении вспомогательного оборудования, присоединении трубопроводов, деталей узлов поступления и отвода продуктов, установке приборов теплового контроля и автоматического регулирования. В процессе монтажа выявляются и устраняются возможные дефекты конструкции и изготовления аппаратуры. Одновременно осуществляется наладка работы деталей и механизмов в целях подготовки аппаратов к эксплуатации.

Проектом производства монтажно-сборочных работ предусматривается обычно следующая последовательность операций сборки:

1. Установка корпуса аппарата на фундамент.

2. Установка греющей поверхности внутри аппарата.

3. Установка обслуживающих площадок и лестниц.

4. Установка элементов, находя-

щихся внутри аппарата (сепараторы, мешалки, распыливающее устройство, регуляторы уровня и др.).

5. Установка крышки аппарата.

6. Подгонка и присоединение всех трубопроводов.

7. Установка арматуры и контрольно-измерительных приборов.

8. Герметизация мест соединения аппарата (крышек, люков, фланцев, сальниковых уплотнений и др.).

9. Присоединение вспомогательных механизмов и устройств.

10. Установка ограждений.

11. Испытание аппарата на герметичность и сдача инспектору Госгортехнадзора.

12. Обкатка механизмов в течение одной рабочей смены.

13. Пробная эксплуатация установки.

14. Проведение теплоизоляционных работ.

15. Сдача установки в эксплуатацию.

Фундаменты аппаратов, установленные на естественном грунте, как правило, имеют лишь небольшую вибрацию, которая не оказывает влияния на работу аппарата и близ расположенного оборудования. При установке аппаратов на площадках нужно обращать особое внимание на тщательную балансировку вращающихся механизмов (шкивов, питателей, мешалок и др.), для того чтобы не возникала значительная вибрация, вредно влияющая на здание или на установленное оборудование.

При динамических нагрузках фундаменты и опорные площадки должны иметь достаточную прочность и устойчивость, а осадка и вибрация не должны превышать допустимых величин. Хорошими материалами, для фундаментов служат естественный камень и красный кирпич, сложенные на цементном растворе, а также бетон марки не ниже 110.

Надежное основание под фундаментом предохраняет его от чрезмерной осадки в процессе эксплуатации. Допустимое давление на твердые скальные грунты составляет 20—40 кг/см². Для грунтов, состоящих из гравия и крупного песка, допустимое давление равно около 6 кг/см². Глинистый грунт средней плотности спо-

собен выдерживать без заметных деформаций давление не более 4 кг/см². Если габариты помещения и расположение оборудования не позволяют установить на естественном грунте фундамент требуемого размера, его возводят на искусственном основании (песчаная постель, деревянные, железобетонные или металлические сваи).

Глубина заложения фундамента в естественном грунте должна быть не менее глубины промерзания последнего. В табл. 5-2 приведена глубина промерзания грунтов для некоторых городов.

Таблица 5-2

Глубина промерзания грунтов, м

Город	Глубина промерзания грунта
Одесса	0,5
Минск	0,8
Киев, Таллин	1,0
Москва, Ленинград	1,2
Волгоград	1,4
Магнитогорск, Свердловск, Омск	1,6

Отклонение по длине и ширине фундамента от расчетных размеров допускается не более ± 30 мм. Верхняя плоскость фундамента должна быть ниже проектной отметки на 30—50 мм, что необходимо для выверки аппарата по высоте и соответствия уровню чистого пола. Эксцентриситет центра тяжести аппарата и центра фундамента не должен превышать 3—5% от размера соответствующей стороны подошвы фундамента. Под окончательно установленным и выверенным аппаратом производят подливку опор и заливку анкерных болтов крепким цементным раствором (1:2) или бетоном марки 140.

Фундаментные (анкерные) болты можно устанавливать при изготовлении фундамента, если места их установки выверяются шаблоном, выполненным по аппарату, или в специально высверленные в готовом фундаменте отверстия с последующей заливкой их цементным раствором. Для того чтобы анкерные болты плотно держались в бетонной заливке, их головки часто делают разведенными или заершенными. При установке не-

скольких аппаратов расстояния между их фундаментами измеряют от одного из крайних фундаментов (базового) как в поперечных, так и в продольных рядах, по натянутой по центрам фундаментов стальной проволоке. Время выдержки фундамента и подливки под аппаратом, необходимое для затвердевания, колеблется от 12 до 16 суток (табл. 5-3). В случаях, когда необходимо сократить время скрепления болтов с фундаментом, их заливку производят плавленной серой.

Таблица 5-3

Сроки готовности фундаментов

Материал фундамента	Время от конца постройки до монтажа аппарата, сутки	Время от подливки до начала эксплуатации, сутки
Кирпичная кладка	2—3	4—5
Железобетон и бетон	2—4	4—10
Бутобетон и бутовая кладка . .	4—6	8—12

При установке теплообменного аппарата на металлической конструкции должны быть соблюдены следующие требования:

1. Колонны металлической конструкции следует сваривать и собирать по шаблонам и кондукторам, что позволяет изготавливать их с минимальными допусками в размерах.

2. Должна быть обеспечена перпендикулярность опорных плоскостей и площадок к осям колонн.

3. Отклонения по высоте опорных плоскостей от основания колонны не должны превышать ± 5 мм.

4. Допуски в размерах прогонов металлических конструкций не должны превышать ± 5 мм.

5. Отклонение от горизонтальной плоскости на всю длину прогона не должно превышать 10 мм.

6. Отклонения от номинальных размеров расстояний между базовой колонной и каждой из последующих колонн не должно превышать ± 5 мм, а между одним поперечным базовым прогоном и каждым из остальных прогонов — не более ± 10 мм.

7. Параллельность установленных в одном ряду колонн определяют натянутой вдоль ряда струной; при этом

не должно быть заметных перегибов струны.

Установленные и выверенные колонны крепятся на фундаментах анкерными болтами. На кронштейнах смонтированных колонн устанавливают неподвижные опоры и подвижные ролики для установки аппарата.

После установки корпуса и основных элементов аппарата приступают к монтажу обслуживающих площадок. Коммуникации (паро- и конденсатопроводы, трубопроводы обрабатываемой среды, дренажи, воздушники и т. п.) монтируют после полной сборки, окончательной выверки и закрепления аппарата на его основании.

5-3. ИСПЫТАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ

Испытания теплообменников на прочность и плотность, а также их приемка на заводе-изготовителе являются обязательным условием для сдачи готовой продукции.

Если размеры готового изделия превышают транспортные габариты, сборку предварительно заготовленных и подогнанных узлов и деталей, а также испытание и приемку аппаратов производят на месте монтажа.

Для проверки на прочность и плотность аппаратов, работающих под давлением свыше 0,7 атм или под вакуумом, их испытание производят одним из следующих способов: гидравлическое испытание; испытание керосином; проверка герметичности водяным паром; пневматическое испытание; испытание на герметичность теченискателем; испытание флуоресцентном.

Гидравлическое испытание. Цель гидравлического испытания — проверка швов и мест уплотнения разъемов аппаратов и установок на прочность и плотность.

В процессе сборки аппарата или всей установки производят отдельно гидравлическое испытание корпуса, трубной системы (если она извлекается из аппарата), собранного аппарата, а также аппарата со вспомогательным оборудованием на месте эксплуатации.

Правилами Госгортехнадзора установлены следующие нормы испытательного давления для сосудов (кроме цельнолитых): для сосудов на рабочее давление до 5 *ати* — полуторное рабочее давление, но не менее 2 *ати*, для сосудов на рабочее давление более 5 *ати* — 1,25 рабочего давления, но не менее рабочего давления плюс 3 *ати*; для сосудов, работающих под вакуумом, 2 *ати*.

При гидравлическом испытании аппаратов, имеющих значительные размеры, принимают меры против прогиба корпуса при наполнении его водой.

Подготовку и проведение гидравлического испытания корпуса теплообменного аппарата производят в следующем порядке. После внутреннего и внешнего осмотра и очистки заглушают все отверстия, патрубки, штуцера и люки. Для этого применяют резьбовые пробки с резиновыми прокладками, заглушки с резиновыми прокладками, а также крышки для люков и лазов. В отверстия, просверливаемые в верхней части аппарата (обычно в заглушках на штуцерах), или в имеющиеся штуцера ввертывают или вваривают временные ниппеля. Через один ниппель аппарат наполняют посредством шланга водой от водопровода, другой ниппель служит для выхода воздуха из аппарата при наполнении его водой. Третий временный ниппель, устанавливаемый в нижней части аппарата, служит для удаления воды после испытания.

Чтобы поверхность аппарата не запотевала, температура воды должна быть не ниже температуры окружающей среды, но не выше 40°С, чтобы температурные расширения не расстроили вальцовку. Нельзя также производить гидравлическое испытание сосудов водой с температурой 0°С. Необходимо следить, чтобы в аппарате не оставалось воздушных мешков.

После наполнения водой аппарат плотно закрывают резьбовой пробкой с резиновой прокладкой. Вместо шланга от водопровода к водяному ниппелю присоединяют шланг от гидравлического насоса или пресса с ручным механическим приводом. На шланге у пресса должен быть уста-

новлен трехходовый кран для сообщения аппарата с атмосферой и установки манометра. Таким образом, сосуд герметически закупоривается и подготавливается к испытанию.

Приведя в действие насос, в аппарате создают испытательное давление, поддерживаемое в течение 5 *мин*; за это время показание манометра не должно заметно измениться.

Через 5 *мин* давление в аппарате снижают с помощью трехходового крана до рабочего давления, которое поддерживают в течение всего периода технической приемки аппарата, но не менее 2 ч. При этом производят наружный осмотр аппарата с целью обнаружения нарушений прочности или плотности: вспучиваний в корпусе, разрывов бандажей, трещин в швах или возле отверстий, течи и запотевания в сварных и заклепочных швах и в резьбовых соединениях. Район швов обстукивают молотком весом от 0,5 до 1,5 *кг*. При испытаниях кожуха с вставленной трубной системой или с жестко закрепленными трубками просматривают плотность вальцовки или других креплений труб.

Места с недостаточной плотностью или прочностью отмечают мелом. Результаты гидравлического испытания признаются удовлетворительными, если в течение 2 ч снижения давления по манометру не превышает 5% испытательного давления.

Результаты гидравлического испытания заносятся в книгу-паспорт аппарата, хранящуюся в ОТК завода.

Для обнаружения мест неплотности в сварных соединениях сварные швы перед испытаниями прокрашивают мелом, разведенным на воде, а затем просушивают. В случае неплотности при гидравлическом испытании в местах пропусков воды образуются влажные пятна, видимые на меловом покрытии. Дефектные места в сварных швах вырубает на всю глубину и вновь заваривают вручную электродом с качественной обмазкой.

Трубы с признаками неплотности (течи, слезинки, запотевания) подвальцовывают или заменяют новыми. Подвальцовка (не более 2 раз) дает положительный результат только в том случае, когда деформация труб-

ной доски происходит в пределах упругой области. Перевальцованные соединения имеют, как правило, остаточную деформацию, которая при дальнейшей развальцовке не дает надежного уплотнения. После устранения обнаруженных дефектов обязательно повторное гидравлическое испытание в прежнем порядке.

Для создания условий безопасности в процессе работ, связанных с гидравлическими испытаниями и устранением дефектов, все работы производятся при надежной изоляции испытательного стенда от других рабочих мест в цехе.

Рабочие, участвующие в испытаниях, обеспечиваются защитными приспособлениями и устройствами — спецодеждой, очками, масками, переносными щитками.

Работы по устранению дефектов (подвальцовку труб, вырубку швов, заварку и др.) производят только на сосуде, не наполненном водой, и при давлении не выше нуля.

Испытание керосином. Большие трудности представляет обнаружение течи в теплообменных аппаратах с трубами, приваренными к доскам. Гидравлическое испытание водой, как правило, не дает хорошего результата, так как микроскопические трещины в сварных швах обнаруживаются только при нагреве. Поэтому плотность крепления труб необходимо проверять при испытательном давлении и рабочей температуре. Такая проверка не всегда осуществима.

В таких случаях хорошие результаты дает гидравлическое испытание трубчатки или всего аппарата керосином. Для обнаружения протекания керосина поверхности трубных решеток и сварных швов сосуда окрашивают меловым раствором и просушивают. Наполненный керосином сосуд выдерживают в течение 30—50 мин, если по истечении этого времени на окрашенных местах не появятся масляные пятна, плотность швов признается удовлетворительной.

При невозможности проведения гидравлического испытания керосином можно рекомендовать проверку герметичности водяным паром давлением 0,5 ат. Пар, проникающий через неплотности, также образу-

ет хорошо различимые на меловой окраске влажные пятна.

Пневматическое испытание. Если гидравлическое испытание неосуществимо (большие напряжения от веса воды, трудность удаления воды, наличие внутри сосуда футеровки, препятствующей заполнению сосуда водой), разрешается заменять его пневматическим испытанием, с помощью воздуха или инертного газа, на такое же испытательное давление, как при гидравлическом испытании.

Проверяемые на плотность сварные швы, уплотняемые соединения и другие места аппарата, вызывающие сомнения в их плотности, промазывают мыльной водой. Проникающий через неплотности сосуда воздух или газ образует легко обнаруживаемые мыльные пузыри.

При пневматическом испытании принимают особые меры предосторожности. Испытания производят в присутствии лиц, ответственных за их проведение и за технику безопасности.

Основные правила пневматического испытания:

1. Слабые элементы сосуда окрашивают меловой краской, а сварные швы и разъемные соединения промазывают мыльной водой.

2. Давление в сосуде повышают постепенно до 50% установленного рабочего давления. Если обнаружатся мыльные пузыри, принимают меры к устранению течи на сосуде без пневматического давления.

3. Дальнейшее повышение давления до испытательного производят ступенями, равными 10% рабочего давления, с тщательным осмотром в перерывах швов и изменений в меловом покрытии на слабых местах сосуда.

4. Если в наиболее слабых элементах сосуда появились признаки текучести металла (слой меловой окраски растрескался и начал осыпаться), давление в сосуде должно быть немедленно снижено на $\frac{1}{3}$.

5. Сосуд считается выдержавшим пневматическое испытание, если при его проведении не были замечены текучесть металла и пропуски воздуха в сварных швах и разъемных соединениях.

Если при удовлетворительной герметичности сосуда обнаружены при-

знаки текучести металла, то максимальное рабочее давление устанавливают равным 50% испытательного давления независимо от установленного по проекту или сосуда бракуют.

6. Для быстрого выявления пропусков и течи в сварных швах и в разъемных соединениях аппарата рекомендуется производить пневматическое испытание с примесью к воздуху или газу аммиака. При поступлении в сосуд теплого воздуха аммиак испаряется. Если к сварным швам и разъемным соединениям сосуда поднести смоченный в соляной кислоте жгут, то образование белого дыма указывает на наличие течи и пропусков.

Испытание теческательем. Установки и аппараты, работающие под разрежением, должны удовлетворять требованиям в отношении высокой герметичности. Вакуумные испытания аппаратов и установок производят при помощи теческательей.

Перед испытанием отверстия смонтированного аппарата или установки герметически закрывают пробками или заглушками на высококачественных прокладках. После этого производят предварительное испытание на герметичность воздухом или инертным газом под давлением, соответствующим техническим условиям. Затем устраняют неплотности в швах и уплотняющих соединениях, обнаруженные обмыливанием.

Убедившись в отсутствии видимых утечек, приступают к откачке из аппарата или установки воздуха вакуумнасосом. По достижении постоянного рабочего вакуума дальнейшее определение мест проникновения воздуха производят теческательем.

В качестве теческательей применяют трансформаторы Тесла, ионизационные манометры, масспектрографы и теплоэлектрические манометры. Для обнаружения течи в закрытых объемах можно использовать также метод меченых атомов.

Ниже в качестве примера рассматривается работа галоидного (ионизационного) теческателья. Принцип его действия основан на эффекте эмиссии положительных ионов, испускаемых раскаленной платиной, резко возрастающем в присутствии паров галоидов. Этот эффект заметен при парциальном давлении паров галоида порядка 10^{-8} мм рт. ст.

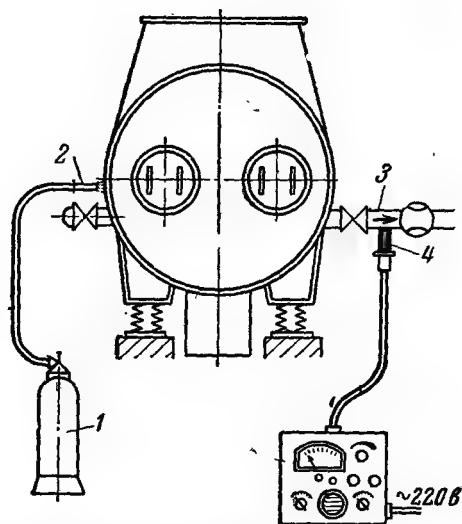


Рис. 5-6. Схема галоидного теческателья.
1 — баллон с фреоном, снабженный редукционным клапаном; 2 — сопло; 3 — трубопровод для отсоса воздуха; 4 — датчик; 5 — измерительный прибор.

Схема устройства для отыскания неплотностей в сосудах, работающих под глубоким вакуумом, изображена на рис. 5-6.

Газ, содержащий галоид, находится в сжатом состоянии в баллоне 1, из которого он выходит через редукционный клапан, гибкий шланг и сопло 2. Струю выходящего из сопла газа направляют на места, где предполагается наличие неплотности. Если она действительно имеется, газ проникнет в сосуд, а затем достигнет трубопровода 3 для отсоса воздуха.

Датчик 4 галоидного теческателья целесообразно располагать в этом трубопроводе возможно ближе к сосуду, что обеспечивает быстрое и надежное обнаружение газа, содержащего галоид. Появление последнего в датчике вызывает отклонение стрелки микроамперметра, включенного в электрическую схему измерительного прибора 5, соединенного с датчиком при помощи бронированного кабеля.

Измерительный прибор смонтирован в общем корпусе с усилителем и устройством для подключения к сети.

В качестве вещества, содержащего галоид, хорошо зарекомендовал себя фреон-12 (CF_2Cl_2). Он не ядовит, не горюч и не агрессивен. Поставляется в стальных баллонах различной емкости; в небольших баллонах может быть использован для переносных устройств. Малые его концентрации внутри сосуда дают резкое повышение эмиссии ионов, испускаемых раскаленной платиной.

В качестве материала для электрода может быть использована слаболегированная платина.

Испытание флуоресценции. Один из самых надежных и быстрых современных методов обнаружения неплотности в аппаратах, предназначенных для работы под вакуумом, — люминесцентный метод с использованием флуоресцеина. Флуорес-

цеин (диоксифлуоран) $C_{20}H_{12}O_{15}$, органическое соединение — красный кристаллический порошок, слабо растворимый в воде. При приготовлении раствора для лучшей растворимости целесообразно добавлять в воду едкий натр; флуоресценция легко смывается водой, не токсичен; коррозионно не активен, в щелочных растворах сильно флуоресцирует. Применение его при испытании конденсаторов тепловых электростанций подтвердило возможность обнаруживать неплотности, остающиеся незамеченными при гидравлическом испытании.

После остановки турбогенератора из водяных камер конденсатора спускают оставшуюся воду, а паровое пространство конденсатора заполняют конденсатом. Через люк или штуцер в конденсатор заливают раствор флуоресцеина. Для хорошего перемешивания раствора флуоресцеина с водой заранее приготовленный раствор подают постепенно, по мере заполнения парового пространства конденсатором. По опыту ВТИ наиболее благоприятная концентрация флуоресцеина в воде составляет 7—10 мг/л.

После заполнения парового пространства конденсатора раствором флуоресцеина облучают трубные доски и другие места, где могут быть неплотности, переносной ультрафиолетовой лампой. Вода, содержащая флуоресцеин, светится под действием ультрафиолетового облучения ярким желто-зеленым светом, отчетливо выявляя малейшие неплотности на обследуемой поверхности.

Во время облучения поверхности ультрафиолетовыми лучами вблизи не должно быть белого света, так как при этом эффект свечения флуоресцеина резко снижается. Качество контроля плотности повышается при увеличении давления воды в испытываемом объеме до 1—2 атм.

Если в аппарате имеются большие неплотности, которые могут быть обнаружены без применения ультрафиолетового облучения, то эти неплотности должны быть устранены при обычном освещении. Затем исследуемые поверхности обмывают водой для устранения следов флуоресцеина и обнаружения менее значительных неплотностей, после чего повторяют кон-

троль с помощью ультрафиолетовой лампы.

Для ультрафиолетового облучения можно пользоваться люминесцентными минералоскопами, оборудованными медицинской ртутно-кварцевой лампой и ультрафиолетовым фильтром. Спектр видимых лучей почти полностью задерживается этими фильтрами, а пропускаются только ультрафиолетовые лучи с длиной волны от 315 до 400 мкм. Облучатель присоединяют к сети переменного тока напряжением 220 в через трансформатор и заземляют.

Для защиты персонала от действия ультрафиолетовых лучей лампа должна быть снабжена металлическим кожухом с отверстием 100×100 мм². Особенно опасны ультрафиолетовые лучи для глаз.

5-4. ТРУБОПРОВОДЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТАНОВОК, ПОДВЕДОМСТВЕННЫЕ ИНСПЕКЦИИ ГОСГОРТЕХНАДЗОРА

По требованиям, предъявляемым к качеству труб и сварке, трубопроводы разделяются на четыре категории в соответствии с «Правилами устройства, установки, содержания и освидетельствования паропроводов и трубопроводов горячей воды», разработанными Госгортехнадзором (табл. 5-4).

При определении категории в случае несоответствия одного из параметров следует руководствоваться большим параметром. Для трубопроводов категории III (б) сварные трубы допускаются для условного давления не выше 16 атм. При температуре пара 450°С трубы из углеродистой стали допускаются лишь при условии выполнения требований ГОСТ 3919-47, т. е. при колебаниях температуры $\pm 10^\circ\text{C}$. Требования Госгортехнадзора не распространяются на трубопроводы категорий II, III и IV наружным диаметром менее 76 мм и на трубопроводы категории I наружным диаметром менее 51 мм. Трубопроводы для горячей воды теплосетей с давлением до 13 атм и температурой до 150°С относятся к IV категории.

Трубопроводы должны изготавливаться в соответствии с проектом. Отступ-

Категории трубопроводов в зависимости от теплоносителей и их параметров

Категория трубопроводов	Наименование среды *	Параметры среды		Вид трубы
		давление (избыточное), кг/см ²	температура, °С	
I /	а) Перегретый пар	Свыше 40	Свыше 450	Бесшовные высококачественные по специальным ТУ
	б) Перегретый пар	29—40	От 425 до 450	Бесшовные качественные по ГОСТ
	в) Вода питательная, насыщенный пар	Свыше 80	Независимо	Бесшовные высококачественные по специальным ТУ
II	а) Перегретый пар	29—30	До 424	Бесшовные по ГОСТ
	б) Насыщенный пар и питательная вода	До 80	Независимо	То же
III	а) Перегретый и насыщенный пар, питательная вода	8—28	До 375	То же
	б) Перегретый и насыщенный пар и горячая вода	8—21	До 300	Бесшовные и сварные по ГОСТ
IV	Перегретый и насыщенный пар, горячая вода	1,7	До 250	То же

ления от проекта должны согласовываться с проектирующей организацией.

При проектировании сварных трубопроводов должны соблюдаться Правила Госгортехнадзора в части расчетных коэффициентов прочности сварных швов, видов швов, качества электродов, допустимых мест стыкования, квалификации сварщиков и др.

Гнутье труб для монтажа трубопроводов допускается по наименьшему радиусугиба в следующих пределах:

при горячем изгибании труб — не менее 3,5 наружных диаметров трубы;

при холодном изгибании труб без заполнения их песком — не менее 4 наружных диаметров трубы;

при загибании трубы в отводы или колена с полурифленными складками (с одной стороны) без набивки песком, но с нагревом газовой горелкой — не менее 2,5 наружных диаметров трубы.

При невозможности выдержать установленный радиусгиба изготавливают колена, сваренные из отдельных секторов труб.

Соединения отдельных труб трубопровода между собой должны быть сварными; фланцевые соединения допускаются только в местах присоединения фланцевой арматуры.

Прокладки для фланцевых соединений трубопроводов с теплоносителем, имеющим температуру выше 70°С, изготавливают из паранита или другого материала, устойчивого в данной среде. Не разрешаются пенковые, хлопчатобумажные и резиновые прокладки.

Опоры и подвески трубопроводов, подвергающихся гидравлическим испытаниям, должны быть рассчитаны на вес трубопровода, заполненного водой и покрытого тепловой изоляцией, а также на силы, возникающие при термической деформации трубопровода.

В трубопроводах с горячим теплоносителем должна быть обеспечена надежная компенсация температурных удлинений с разделением компенсируемых участков неподвижными опорами. На трубопроводах с теплоносителем при температурах 300—350°С должны быть установлены индикаторы для контроля за расширением трубопровода и наблюдения за правильною работой опор.

На трубопроводах диаметром 350 мм и более, а на паропроводах диаметром 200 мм и более задвижки и вентили рекомендуются выполнять

Раскраска и надписи на трубопроводах различного назначения

Назначение трубопроводов	Вид среды	Условное обозначение	Основной цвет	Цвет колец	Цвет полос
Паропроводы	Перегретый пар острый в. д. Перегретый пар острый с. д. Насыщенный пар острый Пар промежуточного подогрева с. д. Пар отборный и противодавления	П. П./в. д. П. П./с. д. П. Н. П. Пр/с. д. П. О.	Красный " " " "	Черный Без колец Голубой Желтый Зеленый	Без полос То же " " " " " "
Водопроводы	Питательная вода Химически очищенная вода Конденсат Продувка и дренаж Теплофикационная линия: прямая обратная Пожарный водопровод Техническая вода	В. П. В. Х. В. Х. В. Д. П. С. О. С. В. пож. В. Т.	Зеленый " " " " " Оранжевый Черный	Без колец То же Голубой Синий Желтый Коричневый Без колец То же	Без полос То же " " " " " " " " " " " "
Масло и нефтепроводы	Мазут, нефть, керосин Масло	Н. М.	Черный Коричневый	Без колец Желтый	Без полос " "
Воздухопроводы и короба	Сжатый воздух Горячий дутьевой воздух Холодный дутьевой воздух	В. З. С. В. З. Г. В. З. Х.	Голубой Черный "	Без колец То же " "	Черный Желтый Голубой
Газопроводы и короба (внутри здания)	Дымовые газы Доменный газ Коксовый газ Генераторный газ Нефтяной газ Кислород Ацетилен	Г. Т. Г. Д. Г. К. Г. Г. Г. Н. Г. К. А. Ц.	Темно-серый Желтый " " " Синий Белый	Без колец То же Черный Без колец То же " " " "	Без полос То же " " " " " " " " " "
Пылепроводы	Аэропыль	А. П.	Алюминиевый или светло-серый	То же	То же

с обводными линиями, а также механическими или электрическими приводами. Над местами установки тяжелой арматуры рекомендуется монтировать приспособления для подвески талей.

Горячие трубопроводы необходимо покрывать тепловой изоляцией с таким расчетом, чтобы наружная температура изоляции не превышала 50° С при температуре окружающего воздуха 25° С. Тепловая изоляция фланцевых соединений должна быть съёмной.

В нижних точках каждого участка труб, отделяемого задвижками, должен быть предусмотрен дренажный штуцер с вентилем для опорожнения трубопровода; в верхних точках трубопроводов должны быть установлены воздушники. Для обеспечения

возможности прогрева трубопроводов (паропроводов) и их опорожнения участки, которые могут быть отключены запорными органами, должны быть снабжены в конечных точках устройством для продувки—штуцером с вентилем.

На трубопроводах должны устанавливаться стальная арматура и стальные фланцевые детали, за исключением некоторых оговоренных случаев.

Трубопроводы, проложенные в местах, доступных для обслуживания, должны иметь наружную окраску и надписи (табл. 5-5).

На слой основной краски трубопровода наносят цветные кольца шириной до 100 мм, цвет которых соответствует

назначению трубопровода. В зависимости от местных условий расстояние между кольцами выбирают от 1 до 5 м. Нанесение колец обязательно перед входом трубопровода в стену и после выхода его из стены, а также по обе стороны задвижек и вентиляй.

На поверхностях некруглого сечения (газоходов, коробов и т. п.) со стороны, видимой с рабочих мест, наносят цветные полосы шириной 100 мм и длиной от 1 до 2 м так же, как на трубопроводах.

Теплопроводы в непроходных камерах и при бесканальной прокладке окрашивают только в пределах камер, а в проходных каналах окрашивают через каждые 10 м.

Не допускается различная окраска одного и того же трубопровода, проходящего по нескольким помещениям. Наружные газопроводы окрашивают в серый или защитный цвет.

На трубопроводах должны быть нанесены следующие надписи:

на магистральных линиях — номер магистрали римской цифрой и стрелка, указывающая направление движения среды;

на ответвлениях вблизи магистралей — номер магистрали римской цифрой, буквенное обозначение агрегата и стрелка, указывающая направление движения;

на ответвлениях от магистралей вблизи агрегата — номер магистрали римской цифрой и стрелка, указывающая направление движения.

Трубопроводы перед пуском в эксплуатацию и в процессе эксплуатации контролируются наружным осмотром и гидравлическими испытаниями по установленным нормам.

5-5. АРМАТУРА И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТАНОВОК

Для обеспечения пуска, правильного режима работы, остановки и безопасности в эксплуатации теплообменной аппаратуры на ней устанавливается следующая арматура:

1. Запорные приспособления для отключения аппарата от трубопровода.
2. Приспособления для выпуска находящейся или образующейся в аппарате среды.
3. Манометры, снабженные приспособлением для дополнительной установки контрольных манометров. В зависимости от условий рабо-

ты и свойств среды, находящейся в сосуде, манометры снабжаются в необходимых случаях сифонными трубками, масляными буферами или другими устройствами, предохраняющими манометры от непосредственного воздействия среды. По согласованию с Инспекцией Госгортехнадзора сосуда, работающие со средой высокого давления или высокой температуры, ядовитой или взрывоопасной, могут не снабжаться приспособлениями для установки контрольного манометра. Это относится также к нестационарным (передвижным) сосудам независимо от свойств и параметров среды.

4. На сосудах, работающих под давлением выше 0,7 атм, не менее одного рычажного или пружинного предохранительного клапана, отрегулированного на предельно допускаемое рабочее давление и снабженного приспособлением, не позволяющим обслуживающему сосуд лицу увеличивать нагрузку клапана.

5. На сосудах, обогреваемых непосредственно пламенем или топочными газами с температурой выше 650°С, в которых уровень жидкости может опускаться ниже линии огневого нагрева, — указатель уровня жидкости.

6. На каждом открываемом сосуде — приспособления, дающие возможность перед вскрытием сосуда снижать в нем давление и при необходимости удалять из него содержи-

мое. Вентили и задвижки аппаратов и трубопроводов должны быть снабжены: надписями с номерами согласно инструкции и схеме коммуникаций теплообменной установки, указателями направления движения теплоносителя и степени открытия вентиляй и задвижек.

Если вентили и задвижки не доступны для непосредственного обслуживания или когда непосредственное обслуживание затруднено, их снабжают дистанционным управлением.

Размеры, конструктивное оформление, материал и условия эксплуатации арматуры приводятся в соответствующих ГОСТ (табл. 5-6).

Таблица 5-6
Основные стандарты на арматуру

ГОСТ 5761-51	Вентили литые и кованные из углеродистой и легированной стали
ГОСТ 5360-50	Вентили запорные из ковкого чугуна
ГОСТ 6681-53	Вентили запорные из серого чугуна на $P_y=10$ и 16 кг/см^2
ГОСТ 3326-53	Вентили и клапаны обратные
ГОСТ 4066-48	Вентили запорные и клапаны обратные, муфтовые, из ковкого чугуна на $P_y=10$ и 16 кг/см^2
ГОСТ 5762-51	Задвижки стальные и чугунные
ГОСТ 3706-51	Задвижки фланцевые
ГОСТ 5335-50	Клапаны предохранительные рычажно-грузовые чугунные на $P_y=16 \text{ кг/см}^2$
ГОСТ 5260-50	Маховики чугунные для трубопроводной арматуры

Манометры должны быть проверены и запломбированы в местных органах Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.

Манометры не допускаются к применению, если на них нет пломбы, просрочен срок проверки, стрелка манометра при его выключении не возвращается к упорному штифту или при отсутствии штифта отклоняется от нулевого показания шкалы на величину, превышающую половину погрешности, допустимой для данного манометра.

Манометр следует выбирать с такой шкалой, чтобы при рабочем давлении стрелка его находилась в средней трети шкалы. На циферблате манометра должна быть нанесена красная черта, проходящая через деление разрешенного рабочего давления. Взамен красной черты, наносимой на циферблате манометра, разрешается пользоваться припаянной снаружи манометра металлической пластинкой, окрашенной в красный цвет и плотно прилегающей к стеклу манометра. Класс точности манометра должен быть равен 1,5, т. е. погрешность не должна превышать 1,5% предельного показания шкалы.

Пружинные манометры следует присоединять к аппаратам посредством коррозионно-стойкой сифонной трубки, которую необходимо регулярно продувать. Манометры, установленные на высоте 5 и более метров от уровня площадки для обслуживания, должны быть снабжены циферблатом диаметром не менее 300 мм, а при высоте установок менее 5 м размеры шкалы должны обеспечивать хорошую видимость показания стрелки манометра. Циферблат манометра должен устанавливаться в вертикальной плоскости или с наклоном вперед до 30° и при этом так, чтобы показания были отчетливо видны обслуживающему персоналу; манометр должен быть хорошо освещен и защищен от влияния лучистой теплоты и охлаждения.

Число и размеры предохранительных клапанов должны быть такими, чтобы в аппарате не могло образоваться давление, превышающее рабочее более чем на 15% при рабочем давлении до 60 атм и на 10% при рабочем давлении свыше 60 атм. Для расчета пропускной способности предохранительного клапана применяется следующая формула:

$$G = 220 \cdot F \cdot p \sqrt{\frac{M}{T}} \text{ [кг/ч]},$$

где G — пропускная способность клапана, кг/ч;
 F — рабочее сечение клапана, см², определяемое для клапанов тарельчатого типа по формуле $F = 2,22 \cdot d_1 \cdot h$ (d_1 — внутренний диаметр седла, см; h — высота подъема клапана, см);
 p — абсолютное давление, кг/см²;
 M — молекулярный вес паров или газов, проходящих через клапан;
 T — абсолютная температура паров или газов.

Предохранительные клапаны должны устанавливаться непосредственно на сосуде. Если по типу конструкции сосуда или по условиям производства такая установка невыполнима, предохранительные клапаны должны быть установлены в непосредственной близости от сосуда на трубопроводе или ответвлении при

условии, что между ними и сосудом нет запорного органа и наблюдение за ними не связано с затруднениями для персонала, обслуживающего сосуд. В особых случаях, с разрешения Госгортехнадзора, разрешается установка запорных органов между сосудами и предохранительными клапанами при условии пломбирования запорного органа в открытом состоянии на время работы сосуда.

Предохранительные клапаны должны быть предохранены от засорения или прикипания. Для проверки исправности клапана обслуживающий персонал должен 1 раз в смену опробовать работоспособность предохранительного клапана путем поднятия рычага от руки.

В тех случаях, когда по роду производства предохранительный клапан не может надежно работать, вместо него сосуд необходимо снабдить предохранительной пластиной, разрывающейся при повышении давления в сосуде на величину, не превышающую 25% рабочего давления.

Если расчетное давление аппарата не меньше давления питающего источника и если исключена возможность повышения давления в сосуде от химической реакции или обогрева, то установка на нем предохранительного клапана и манометра не обязательна при наличии их на источнике давления. Аппарат, работающий при давлении, меньшем, чем давление питающего его источника, должен иметь, кроме запорного клапана, автоматическое регулирующее приспособление с манометром и предохранительным клапаном, установленным на стороне меньшего давления, причем предохранительный клапан должен быть отрегулирован так, чтобы давление в сосуде не могло подняться выше допускаемого. Запорный клапан должен находиться между сосудом и редуцирующим приспособлением, в непосредственной близости от сосуда. Для группы сосудов, работающих при одинаковом давлении, достаточно одного редуцирующего приспособления с манометром и предохранительным клапаном, установленными на общей магистрали до первого ответвления. В этих случаях установка предохранительных клапанов на сосудах не обязательна.

В тех случаях, когда в сосуд вводятся или в нем могут образовываться огне- и взрывоопасные или ядовитые газы, необходимо надежно предотвратить возможность попадания таких газов или паров в рабочее помещение. Это достигается устройством оттяжных труб от предохранительных клапанов или от взрывных пластин. Перед выпуском в атмосферу ядовитые газы должны быть обезврежены.

Измерение качественных и количественных параметров энергоносителей в агрегате посредством контрольно-измерительных приборов необходимо для нормирования расхода энергии, постоянного наблюдения за состоянием и эксплуатацией оборудования и составления энергетического баланса установки, цеха и предприятия, а также для текущего оперативного контроля или диспетчерского управления отдельными энергоснабжающими установками и энергоснабжением предприятия в целом. Для этой цели, кроме показывающих, широко используются самопишущие приборы.

Контрольно-измерительные приборы должны быть установлены так, чтобы их показания

можно было легко наблюдать и чтобы обслуживающий персонал мог контролировать исправность их работы. Для этого устанавливают оперативный щит с указывающими приборами, снабженными передатчиками (электрическими или гидравлическими), а также сигнальной аппаратурой. Контрольно-измерительную аппаратуру для энергоносителей и важнейших технологических продуктов иногда устанавливают на диспетчерских щитах совместно с другими средствами диспетчерского управления (проводной, световой и звуковой сигнализацией).

Во избежание сотрясений и вибраций, связанных с работой оборудования, контрольно-измерительные щиты и приборы следует устанавливать по возможности на основных колоннах и балках здания.

Приборы, по которым ведется контроль работы агрегатов, а также приборы технического учета должны запираться и пломбироваться.

Все теплоизмерительные приборы должны систематически проверяться в лаборатории Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР в устанавливаемый срок. Кроме государственных проверок, производятся периодические проверки в промежутках между ними в сроки, указанные в табл. 5-7. График проверки приборов должен утверждаться главным инженером предприятия и согласовываться с органами Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

Таблица 5-7

Сроки промежуточной проверки контрольно-измерительных приборов

Наименование прибора	Срок и место проверки
Пружинные манометры, вакуумметры и мановакуумметры	2 раза в год на месте установки или в лаборатории
Тягомеры мембранные и колокольные	То же
Расходомеры дроссельные (без дроссельных органов)	1 раз в год на месте установки и 1 раз в год в лаборатории
Дроссельные органы расходомеров	1 раз в 2 года
Термометры ртутные и жидкостные	1 раз в год в лаборатории
Термомпары	То же
Термометры сопротивления	" "
Измерительные устройства термометров сопротивления	2 раза в год на месте установки и 1 раз в год в лаборатории
Измерительные устройства	1 раз в год на месте установки и 1 раз в год в лаборатории
Вторичные приборы солемеров	1 раз в год в лаборатории
Газоанализаторы автоматические на CO_2 и $\text{CO} + \text{H}_2$	1 раз в месяц на месте установки
Кислородомеры	2 раза в год на месте установки

Ремонт устройств дистанционного управления и автоматических регуляторов должен производиться во время ремонта основного оборудования.

Для измерения температуры, расхода, давления и разрежения должны применяться приборы, отвечающие предельным параметрам измеряемого теплоносителя и установленному классу в соответствии с ГОСТ.

5-6. ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТАНОВОК

Значение тепловой изоляции. Теплообменные аппараты и установки, а также вспомогательное оборудование к ним и трубопроводы, наружная стенка которых имеет температуру выше 50°C или ниже 0°C после монтажа, наладки и приемки должны быть покрыты тепловой изоляцией.

Основное значение тепловой изоляции:

а) уменьшение потерь тепла и теплопритоков (для холодильных установок) при эксплуатации энергетических и теплопотребляющих установок и систем;

б) поддержание требуемой температуры технологического процесса при наименьших затратах энергии;

в) повышение производительности технологического оборудования вследствие стабильности теплового режима;

г) создание нормальных санитарно-гигиенических и безопасных условий труда путем сохранения нормальной температуры в рабочих помещениях и предохранения обслуживающего персонала от ожогов;

д) выравнивание температур внутренней и наружной поверхностей установки, что способствует устранению запотевания поверхности и снижению температурных напряжений в аппаратах;

е) защита теплообменников от влияния внешней коррозии и, следовательно, продление срока службы оборудования;

ж) в холодильной технике — длительное сохранение продуктов.

При строительстве стационарных холодильников стоимость тепловой изоляции составляет около $1/3$ стоимости всего строительства, при этом на 1 м^3 емкости холодильника расходуются до $0,6 \text{ м}^3$ изоляционных материалов.

Эффективность тепловой изоляции

Максимально допустимые потери тепла через изоляцию

Наружные диаметры неизолированного цилиндрического объекта, мм	Температура теплоносителя, °C							
	100	150	* 200	250	300	350	400	450

Потери тепла с 1 пог. м изолированного трубопровода, ккал/м·ч

57	60	80	90	—	—	—	—	—
108	85	110	130	165	180	200	220	245
159	105	135	165	195	215	230	265	290
216	120	160	195	235	260	285	315	345
267	135	185	220	265	295	330	365	395
325	155	210	245	300	335	365	410	445
376	170	230	280	330	365	400	445	490
427	185	255	305	355	395	430	475	525
529	220	295	350	410	455	500	545	600

Потери тепла с 1 м² наружной поверхности изоляции, ккал/м²·ч

Для цилиндрических объектов	100	130	150	170	185	200	215	230
Для плоских поверхностей	100	130	150	180	200	225	250	280

Таблица 5-9

Нормы тепловых потерь для изолированных поверхностей с 1 м длины цилиндрического объекта и с 1 м² плоских и криволинейных поверхностей при температуре окружающего воздуха +25° C

Наружный диаметр, мм	Температура теплоносителя, °C											
	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
	Тепловые потери, ккал/м·ч											
10	—	—	22	37	52	67	83	98	115	130	145	160
17	—	—	26	43	61	78	96	113	130	149	169	182
28	—	22	32	51	70	89	108	127	146	166	186	205
38	—	26	36	56	76	96	116	137	157	179	200	220
48	—	29	40	61	82	103	125	146	167	188	210	230
57	22	34	45	65	85	105	130	150	170	195	215	240
76	25	40	50	70	95	115	140	165	190	215	235	255
108	30	50	60	85	110	135	160	190	220	245	275	295
133	35	55	65	90	120	145	175	210	240	270	295	320
159	40	60	75	100	130	160	190	225	260	290	320	340
219	50	75	90	125	160	195	230	270	310	345	380	410
273	60	85	105	145	185	225	265	310	355	395	430	460
325	70	100	125	170	215	260	305	350	400	445	490	530
376	80	115	140	185	235	285	335	385	435	485	540	580
426	90	125	150	205	260	310	360	415	465	520	580	625
529	100	150	170	230	290	350	410	475	535	600	660	715
631	120	175	200	270	335	400	470	535	590	660	735	790
720	130	195	230	310	380	440	520	595	650	720	800	870
820	150	215	260	340	420	490	570	650	710	790	830	950
920	165	240	285	380	465	535	630	710	775	865	960	1 050
1 020	185	265	310	415	505	585	680	770	835	940	1 050	1 150
Плоская поверхность, ккал/м ² ·ч	55	65	75	95	115	135	155	175	190	210	230	250

Таблица 5-10

Толщина изоляции

Диаметр, трубопровода, мм	Предельная толщина изоляции, мм	Диаметр трубопровода, мм	Предельная толщина изоляции, мм
57	65	325	135
108	110	376	140
159	120	427	145
216	125	529	150
267	130	Криволинейная и плоская поверхность	150

весьма высока. Так, потери тепла в окружающую среду через поверхность аппарата с температурой жидкости 200°С после нанесения тепловой изоляции снижаются более чем в 8 раз. Нанесение тепловой изоляции на трубопровод с теплоносителем, имеющим температуру 400°С, дает экономию 10,7 т условного топлива в год на 1 м² поверхности трубопровода.

Нормы тепловых потерь. Показателями тепловой эффективности изоляции служат величины потерь

тепла в окружающую среду и расхода изоляционных материалов, приходящиеся на 1 м² изолированной поверхности. Температура наружной поверхности изоляции не должна превышать 45—50°С при температуре окружающего воздуха +25°С. По нормам теплопотерь, разработанным Теплопроектом и утвержденным МЭС СССР, максимально допустимые потери тепла через изолированные поверхности должны находиться в пределах, приведенных в табл. 5-8. Оптимальные потери тепла определяются по данным табл. 5-9.

Предельная толщина изоляции в зависимости от диаметра аппарата или трубопровода приведена в табл. 5-10.

При расположении установок вне помещения тепловые потери через изоляцию не должны превышать норм, указанных в табл. 5-11.

Свойства теплоизоляционных материалов. К теплоизоляционным материалам предъявляют следующие основные требования:

1. Низкая теплопроводность. Теплоизоляционные материалы разделяются на четыре группы по величине

Таблица 5-11

Нормы тепловых потерь через изоляцию объектов, расположенных вне помещений, при температуре окружающего воздуха—31°С

Наружный диаметр цилиндрического объекта, мм	Температура теплоносителя, °С										
	100	150	203	250	300	350	400	450	500	550	600

Потери тепла с 1 пог. м изолированного трубопровода, ккал/м·ч

22	70	87	102	125	147	174	205	242	280	324	370
28	74	91	107	129	152	180	210	248	287	330	376
35	77	97	112	135	158	186	217	255	297	340	386
42	81	100	117	140	164	193	224	263	304	348	394
60	90	110	129	154	179	210	244	293	325	370	417
76	98	120	140	166	193	225	260	300	345	390	440
89	105	128	149	176	204	237	273	314	360	407	458
114	117	142	166	196	226	260	298	341	388	436	490
140	130	158	184	216	247	284	326	370	419	470	524
168	144	174	202	238	272	312	354	400	452	503	560
219	169	204	237	278	316	359	406	457	512	568	625
273	196	236	274	319	361	409	459	515	575	632	693
325	222	266	309	360	406	458	512	573	635	696	762
377	248	297	344	400	450	506	566	629	696	760	830
426	273	326	379	438	494	552	615	683	754	821	895
476	298	356	413	478	537	600	667	738	815	884	960
529	325	388	449	519	583	650	722	798	876	950	1 030

Потери тепла с 1 м² наружной поверхности изоляции, ккал/м²·ч

Плоская поверхность	153	183	213	243	273	303	333	363	393	423	453
---------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

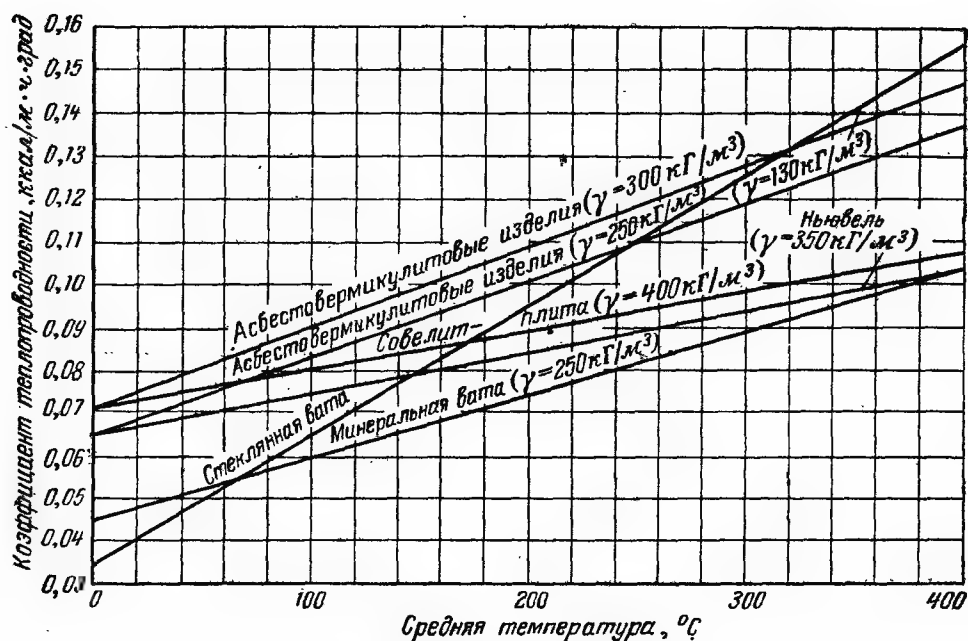


Рис. 5-7. Изменение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов в зависимости от температуры.

коэффициента теплопроводности λ при температуре 100° С:

Класс	λ , ккал/м·ч·град
А	$\leq 0,07$
Б	0,07—0,10
В	0,11—0,15
Г	0,16—0,18

Теплопроводность изоляционных материалов зависит от их структуры, пористости, влажности и температуры. На рис. 5-7 приведено изменение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов в зависимости от температуры.

Коэффициент теплопроводности материалов, применяемых в холодильной технике, должен быть не более 0,07 ккал/м·ч·град (класс А).

2. Малый объемный вес. Объемный вес изоляционных материалов находится в пределах от 100 до 400 кг/м³. Объемный вес одного и того же материала колеблется в зависимости от пористости, степени слежалости, и влажности. Так, например, объемный вес торфяных плит может изменяться от 170 до 250 кг/м³.

Материалы с малым объемным весом имеют, как правило, низкую прочность, что требует усиленной конструкции защитного покрытия. Общий вес

изоляции и конструкции защитного покрытия не должен превышать 650 кг/м² для стационарных установок, для передвижных 250 кг/м².

3. Низкая гигроскопичность и способность мало набухать при погружении в воду. С увеличением влажности увеличиваются теплопроводность и объемный вес изоляции и снижается ее механическая прочность. Гигроскопичность некоторых теплоизоляционных материалов приведена в табл. 5-12.

Насыщение влагой изоляционных материалов, предназначенных для работы при температурах ниже 0° С, имеет большое значение, так как коэффициент теплопроводности льда (1,9 ккал/м·ч·град) почти в 4 раза больше коэффициента теплопроводности воды (0,5 ккал/м·ч·град) и в 40 раз больше коэффициента теплопроводности стеклотной ваты (0,39 ккал/м·ч·град).

4. Высокая теплостойкость и температуростойкость. Теплостойкостью называется способность материала выдерживать без существенного изменения свойств многократные резкие изменения температуры. Чувствительность теплоизоляционного материала к резким колебаниям температуры снижается с увеличением его пористости.

Гигроскопичность теплоизоляционных материалов

Название материала	Объемный вес, кг/м³	Влажность материала, %			
		при воздушно-сухом состоянии		при насыщенном влагой воздухе	
		весовая абсолютная	объемная	весовая абсолютная	объемная
Войлок шерстяной	120	10	1,2	36,6	44,4
Диатомит и трепел	500	8	4	20	10
Кирпич диатомитовый тепло- изоляционный	500	1,5	0,75	7,1	3,5
Пенобетон	350	3,6	1,25	8,3	2,9
Плиты древесноволокнистые	230	11	2,5	32	7,4
Пробка натуральная	200	8	1,6	14	2,8
экспанзит	130	1,3	0,17	8	1
Плиты торфоизоляционные	220	16	3,5	28	6,2
Шлак котельный	800	2	1,6	3,4	2,7
Пробка минеральная	300	1	0,3	6	1,8

Температуростойкостью называется способность материала сохранять свойства под воздействием высоких температур. Изоляционный материал не должен гореть и поддерживать горение, а также не должен тлеть при удалении пламени.

На прочность и сохранность изоляции наружных сооружений и холодильных установок существенно влияет морозостойкость. При недостаточной эластичности изоляционного покрытия внутрикапиллярная вода при замерзании разрывает стенки пор и разрушает изоляцию.

5. Прочность изоляционных материалов колеблется в широких пределах. Прочность теплоизоляционной конструкции может быть повышена устройством каркаса, наложением специальных укрепляющих слоев, а также созданием прочного отделочного наружного слоя.

6. Низкие воздухо- (газо-) и паропроницаемость. Если изоляционный материал легко пропускает газы и пары, то к стенке сосуда могут проникать холодный воздух, газы или пары, вызывая, кроме охлаждения, увлажнение, коррозию и разрушение стенки и изоляционных конструкций. Коэффициенты воздухо- и паропроницаемости некоторых материалов приведены в табл. 5-13. При увлажнении материала эти коэффициенты резко снижаются.

7. Теплоизоляционный материал не должен вызывать или способствовать коррозии оборудования и креплений.

8. Высокая биостойкость. Изоляционный материал должен быть устойчив против гниения, не должен способствовать развитию микроорганизмов и насекомых, а также не должен быть съедобным для грызунов.

9. Отсутствие специфического запаха и невосприимчивость к запахам (важно для холодильников пищевой промышленности), а также свойство не выделять в процессе эксплуатации вредных газов.

10. Дешевизна, доступность, хорошая формуетность.

Таблица 5-13

Коэффициенты воздухопроницаемости и паропроницаемости некоторых материалов

Наименование материала	Коэффициент воздухопроницаемости м³/м·ч·мм вод. ст.	Коэффициент паропроницаемости г/м·ч·мм рт. ст.
Асбестовый картон	—	0,0067
Асбоцемент	—	0,0345
Бетон	—	0,0158
Вата минеральная	0,33	—
Вата стеклянная	—	0,065
Вата шлаковая	0,01	0,0649
Войлок стропильный	—	0,045
Диатомит	—	0,04
Кирпич красный	0,00049	0,0114
Кирпич трепельный	0,002	0,025
Окраска масляная	—	0,00004
Пенобетон	0,00516	0,036
Пеностекло	—	0,0107
Плиты минераловатные	0,015	0,06
Плиты торфяные	0,0545	0,0256
Шевелин	0,01	0,009

Каждый теплоизоляционный материал отвечает обычно не всем из этих требований. В каждом конкретном случае выбор изоляционного материала и конструкции изоляции следует производить на основе технико-экономических соображений.

Некоторые свойства основных теплоизоляционных материалов приведены в табл. 5-14.

Расчет тепловой изоляции. Для определения величины тепловых потерь или снижения температуры теплоносителя в теплообменном аппарате, а также для определения температуры поверхности изоляционного слоя и его оптимальной толщины существуют различные методы расчета, основанные на законах передачи тепла через многослойную стенку. При проектировании тепловой изоляции необходимо учитывать экономические факторы (стоимость одной мегакалории тепла, стоимость изоляционной конструкции, эксплуатационные расходы), имеющие важное значение при выборе изоляционного материала и толщины слоя изоляции [Л. 60].

Тепловые потери, т. е. количество тепла, переданное теплопроводностью через 1 м^2 теплоизоляционного слоя от плоской стенки или цилиндрической поверхности диаметром 2 м и более, определяется при однослойной изоляции по формуле

$$q = \frac{\lambda_{\text{из}}}{\delta_{\text{из}}} (t_{\text{ст}} - t_{\text{из}}) [\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч}], \quad (5-1)$$

а при двухслойной изоляции по формуле

$$q = \frac{1}{\frac{\sigma_{\text{из1}}}{\lambda_{\text{из1}}} + \frac{\sigma_{\text{из2}}}{\lambda_{\text{из2}}}} (t_{\text{ст}} - t_{\text{из}}) [\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч}], \quad (5-2)$$

где $t_{\text{ст}}$ — температура стенки изолированного аппарата, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{из}}$ — температура наружной поверхности изоляции, $^{\circ}\text{C}$;

$\lambda_{\text{из}}$ — коэффициент теплопроводности изоляции, $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

$\delta_{\text{из}}$ — толщина изоляционного слоя, м .

Для цилиндрических аппаратов диаметром менее 2 м и трубопроводов теп-

ловые потери с 1 пог. м длины определяются при однослойной изоляции по формуле

$$q_l = \frac{2\pi\lambda_{\text{из}}}{\ln \frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{ст}}}} (t_{\text{ст}} - t_{\text{из}}) [\text{ккал/м} \cdot \text{ч}], \quad (5-3)$$

при двухслойной изоляции по формуле

$$q_l = \frac{t_{\text{ст}} - t_{\text{из}}}{\frac{1}{2\pi\lambda_{\text{из1}}} \ln \frac{d_{\text{из1}}}{d_{\text{ст}}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{из2}}} \ln \frac{d_{\text{из2}}}{d_{\text{из1}}}} [\text{ккал/м} \cdot \text{ч}], \quad (5-4)$$

где $d_{\text{ст}}$ — наружный диаметр цилиндрической стенки, м ;

$d_{\text{из}}$ — наружный диаметр изоляционного слоя, м .

Коэффициент теплопроводности изоляции определяют по средней температуре изоляционного слоя

$$\lambda_{\text{из}} = \lambda_0 + b \cdot t_{\text{ср}} = \lambda_0 + b \frac{t_{\text{ст}} + t_{\text{из}}}{2}. \quad (5-5)$$

Суммарные тепловые потери через поверхность аппарата или установки с тепловой изоляцией различной конструкции определяют по формуле

$$Q = (q_1 F_1 + q_2 F_2 + q_l L + \dots + q_n F_n) k, \quad (5-6)$$

где $q_1, q_2, q_l, \dots, q_n$ — удельные тепловые потери различных участков изоляции;

$F_1, F_2, E_n, \dots, L$ — поверхности участков установки или длины трубопроводов;

k — коэффициент, учитывающий потери тепла через опоры, неизолированные участки и др.

Толщина однослойной изоляции для плоской стенки и цилиндрических поверхностей диаметром 2 м и более определяется по формуле

$$\delta_{\text{из}} = \left[\frac{t_{\text{ж}} - t_{\text{воз}}}{q} - \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \right]. \quad (5-7)$$

**Коэффициенты теплопроводности, объемные веса и температуры применения тепло-
изоляционных и огнеупорных материалов**

Наименование материала	Объемный вес, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·град	При температуре, °С	Предельная температура применения, °С
Алюминиевая фольга	120—130	0,055	20	550
Асбестит	1 200	0,25	100	100
Асбестовый картон	1 000—1 400	0,135+0,00016 t_{cp}	—	600
Асбестовая ткань	АТ-7 АТ-8 АТ-9	0,106+0,000159 t_{cp}	—	450
Асбестовый шнур	—			450
				200
Асбозурит Д	650	0,12+0,0002 t_{cp}	—	220
Асбозурит ДИ	450	0,16	100	900
Асбозурит Т	850	0,08	100	600
Асбослюда	580	0,20	100	900
Асбогермит марки 500	500	0,12—0,118—0,125	0—50—100	600
		0,10—0,115	30—100	600
Асбоцементные плиты	300	0,075	50	450
Бетон	1 900—2 000	0,8—1,1	20	100
Битум	950—1 000	0,26—0,30	20	90
Вата стеклянная	130	0,034+0,0003 t_{cp}	—	450
Войлок отопительный	90	0,04—0,05	20	90
Войлок строительный	160	0,04—0,05	20	90
Вулканит	400	0,078—0,087	50—100	600
Газобетон теплоизоляционный	400—600	0,095—0,12	25	400
Гипсовая штукатурка	1 600—1 700	0,33	20	100
Диатомит инзенский	650	0,07—0,10	20	1 000
Древесноволокнистые плиты изо- ляционные	400	0,047	20	100
Изделия из ньювеля	275—300	0,09	200	375
Изделия из совелита	360—380	0,10	200	500
Изделия теплоизоляционные диа- томовые	500	0,10—0,16	50—350	900
Камышит	300—400	0,09	20	60
Магнезиальная мастика	1 000	0,2	20	100
Минераловатно-асбестовые плиты КЧ	350	0,068	50	160—450
Минераловатные плиты	350	0,065	30	60
Минеральная вата	200	0,045—0,055	30—100	600
Минеральная пробка	325	0,055	20	70
Минеральный войлок	200	0,055	30	60—200
Новоасбозурит марки 600	600	0,12—0,135	30—100	600
Ньювель	350	0,70	50	350
Опилки древесные	150—250	0,05—0,08	20	60
Пенобетон	400	0,085	20	400
Пеностекло	300	0,071	20	300
Полихлорвинил	100	0,050	20	70
Пробковые плиты	260	0,05	20	120
Руберойд	600—800	0,12—0,15	20	50
Слюда шипаная скрап	275	0,10	100	1 000
Совелит	500	0,085	50	450
Стекловолокно порошок	590	0,075	30	—
Толь кровельный	500—600	0,15—0,20	20	50
Торфоплиты	220	0,05	0	100
Трепел	800	0,12—0,13	20	800
Цементная штукатурка	1 800	0,85—1,0	20	100
Шамотные огнеупорные изделия	1 900	0,6+0,00055 t_{cp}	—	1 670
Шевелин	150	0,04—0,05	20	60
Шлак:				
котельный	700—1 000	0,175—0,245	20	50
доменный	500—900	0,135—0,195	20	50

Для цилиндрических поверхностей диаметром менее 2 м расчетная формула примет вид:

$$\ln \frac{d_{из}}{d_{ст}} = 2\pi\lambda_{из} \left[\frac{t_{ж} - t_{воз}}{q_1} - \left(\frac{1}{\pi d_{вн} \alpha_1} + \frac{1}{\pi d_{из} \alpha_2} \right) \right], \quad (5-8)$$

где $t_{ж}$ — температура жидкости в изолируемом элементе, °C;
 $t_{воз}$ — температура наружного воздуха, °C;

α_1 — коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке трубы, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к воздуху,

$\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

$d_{вн}$ — внутренний диаметр изолируемого элемента, м.

Толщина двухслойной изоляции для плоской стенки и цилиндрических поверхностей диаметром 2 м и более определяется по формулам:

для первого слоя

$$\delta_{из1} = \lambda_{из1} \left(\frac{t_{ж} - t_{1,2}}{q} - \frac{1}{\alpha_1} \right) [м]; \quad (5-9)$$

для второго слоя

$$\delta_{из2} = \lambda_{из2} \left(\frac{t_{1,2} - t_{воз}}{q} - \frac{1}{\alpha_2} \right) [м]. \quad (5-10)$$

Для цилиндрических поверхностей диаметром менее 2 м применимы формулы:

Для первого слоя

$$\ln \frac{d_{из1}}{d_{ст}} = 2\pi\lambda_{из1} \left(\frac{t_{ж} - t_{1,2}}{q_1} - \frac{1}{\pi d_{вн} \alpha_1} \right), \quad (5-11)$$

для второго слоя

$$\ln \frac{d_{из2}}{d_{из1}} = 2\pi\lambda_{из2} \left(\frac{t_{1,2} - t_{воз}}{q_1} - \frac{1}{\pi d_{из1} \alpha_2} \right), \quad (5-12)$$

где $t_{1,2}$ — температура изоляции на границе между двумя слоями, °C.

Монтаж теплоизоляционных конструкций. Теплоизоляционные материалы классифицируют по ряду свойств и признаков. По теплопроводности они делятся, как указывалось выше, на четыре группы. По назначению различают также четыре группы теплоизоляционных материалов: для горячих поверхностей промышленного оборудования и трубопроводов; для холодных поверхностей оборудования и трубопроводов; для строительных сооружений; для нестационарных установок.

По структуре и виду различают: мастичные (сыпучие); штучные (формованные); засыпные (набивные); обертывающие (ватные).

В соответствии со свойствами и структурой материалов применяют различные виды теплоизоляционных конструкций (рис. 5-8).

Изолируемая поверхность должна быть очищена от грязи и ржавчины. Если имеется опасность конденсации влаги на поверхности, желательно покрыть ее антикоррозийным слоем.

Из порошкообразных теплоизоляционных материалов — асболодьяной массы, асботермита, новоасбозурита, ньювеля, совелита и др.

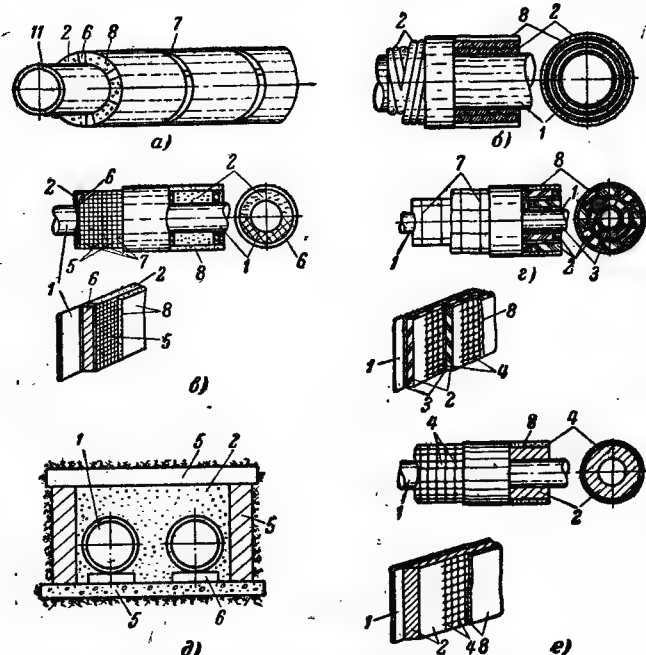


Рис. 5-8. Виды теплоизоляционных конструкций.

а — сборная; б — оберточная; в — набивная; г — из формованных изделий; д — литая; е — мастичная; 1 — изолируемая поверхность; 2 — теплоизоляционный слой; 3 — подмазка; 4 — каркас; 5 — внешняя ограждающая стенка; 6 — опоры; 7 — металлические крепежные кольца; 8 — отделочный слой.

приготавливается для тепловой изоляции ма-
стика.

Будучи затворены водой, эти материалы образуют пластичную массу, удобно наносимую на изолируемую поверхность и способную после просушки затвердевать в прочный тепло-
изоляционный слой. При нанесении мастичных материалов изолируемая поверхность должна быть нагрета, а вода, применяемая для затворения, должна иметь по возможности низкую температуру, так как это обеспечивает высокое качество изоляции. Теплую воду применяют для затворения массы только в зимних условиях.

Мастика должна быть однородной, без комков и посторонних примесей и иметь определенную консистенцию, зависящую от количества воды. Мастку наносят на поверхность постепенно, слоями — по мере их высыхания. Первый слой набрызгивают толщиной 2—3 мм; второй и последующие слои набрасывают толщиной 10—12 мм. Каждый последующий слой наносят после того, как предыдущий слой просох, а возникшие при высыхании трещины замазаны. Последний слой (заделочный) наносят массой более густой консистенции — для получения на слое изоляции прочной защитной корки.

Формованные (штучные) изделия для тепловой изоляции применяются различной конфигурации: для плоских поверхностей — кирпичи, плиты и прямоугольные блоки; для частей оборудования с поверхностями сложной формы — кирпичи с мастичной подмазкой швов, а также специальные скорлупы и сегменты. При укладке на подмазке поверхность изоляционных изделий предварительно увлажняют.

Для закрепления штучных изделий на изолируемой поверхности часто устанавливают крепежные приспособления в виде крюков,

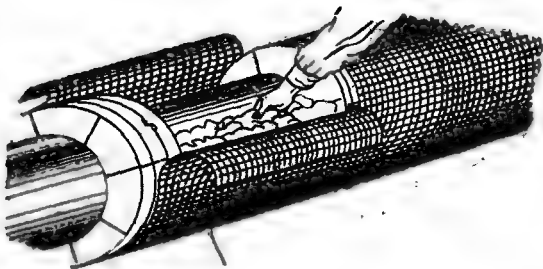


Рис. 5-10. Засыпка минеральной ваты под металлическую сетку.

штырей, скоб, колец, угловых упоров, струн и др. По мере укладки штучные изделия временно обвязывают резиной, а затем закрепляют проволокой (рис. 5-9). Швы и поверхность каждого штучного слоя обмазывают мастикой. Уложенные кирпичи, скорлупы или сегменты окончательно закрепляют кольцами из проволоки или полосовой стали.

Засыпные (набивные) конструкции при производстве изоляционных работ удобны тем, что могут изготовляться в сухом виде при любой конфигурации аппаратуры. Засыпные мелкозернистые материалы (торфяная крошка, обожженный вермикулит и др.), а также волокнистые материалы (минеральная вата, пенка и др.) наносятся на изолируемую поверхность путем утрамбовки в ограждающем устройстве (рис. 5-10).

Для предохранения изоляционного слоя от самоуплотнения при сотрясениях и вибрациях, а также от усадки под действием веса ограждающих устройств и наружного (отделочного) слоя устанавливают опоры, фиксирующие положение отдельных слоев изоляции и ограждающих стен. По окончании набивки пояса изоляции ограждающую стенку стягивают бандажами из полосовой стали или проволочными кольцами и прикрепляют их к крепежным деталям. Порошкообразные и волокнистые материалы в свободном насыпанном состоянии имеют меньшую теплопроводность, чем в уплотненном виде (рис. 5-11).

Обертывающие материалы — асбестовый шнур, войлок, алюминиевая фольга и др. — имеют высокую гибкость и пластичность, т. е.

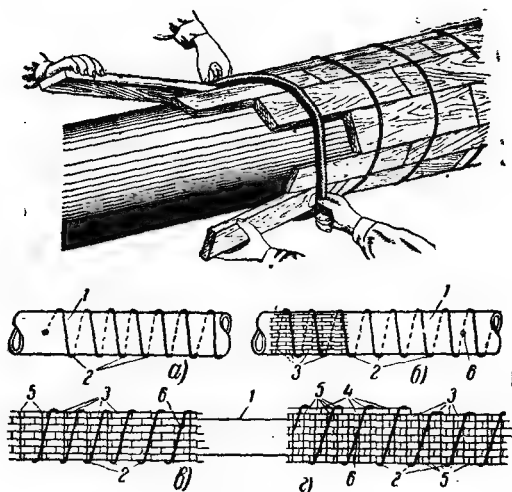


Рис. 5-9. Укладка теплоизоляционных сегментов.

Вверху — под резиновый пояс; внизу — под спиральный резиновый шнур; а — подготовка трубопровода; б — начало укладки сегментов; в — установка проволоочных колец; г — укладка второго слоя изделий; 1 — труба; 2 — витки резинового шнура; 3 — изоляционные сегменты первого слоя; 4 — сегменты второго слоя; 5 — проволоочные кольца; 6 — соединения шнуров.

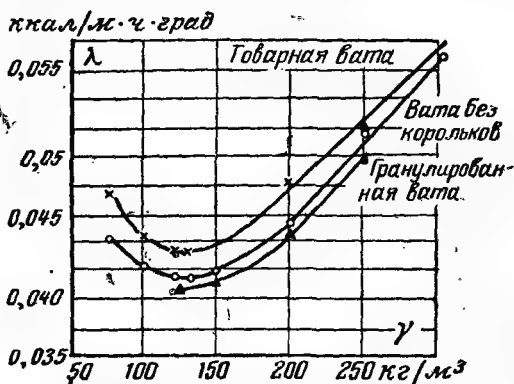


Рис. 5-11. Зависимость коэффициента теплопроводности минеральной ваты от изменения объемного веса.

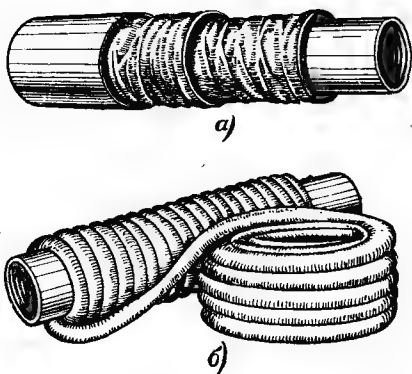


Рис. 5-12. Изоляция асбестовым шнуром и войлоком.

а — трехслойная конструкция из войлока; б — намотка шнура на трубопровод.

легко могут принимать форму изолируемой поверхности (рис. 5-12). Такие материалы применяют в виде заготовленных по форме поверхности матрасов или в виде рулонов, наматываемых на поверхность несколькими слоями.

Для предупреждения появления трещин в тепловой изоляции оставляют температурные швы, заделываемые асбестовым шнуром или другим мягким материалом.

Продолжительность службы изоляционной конструкции в нормальных эксплуатационных условиях составляет: мастичные 5—10 лет; формованные 6—8 лет, засыпные 3—4 года, обертывающие 5—8 лет.

Срок службы тепловой изоляции можно увеличить оштукатуриванием ее магнезиальной мастикой, оклейкой или обшивкой тканью. Оклейка изоляционной конструкции тканью повышает прочность и жесткость наружного защитного слоя. Для оклейки применяют миткаль, марлю, бязь, мешковину и другие хлопчатобумажные ткани.

В качестве клеящих веществ используют крахмал, казеин, белую глину и др. Для удлинения срока службы оберточного слоя и предохранения ткани и изоляции от разрушения их покрывают защитным слоем — масляной краской, битумом, а иногда и металлическим кожухом.

Если по местным условиям металл теплообменных установок может разрушаться под изоляцией, последняя должна быть съемной.

При установке теплообменных аппаратов на открытом воздухе тепловая изоляция должна быть защищена гидроизоляционным покрытием.

Теплообменная установка, трубопроводы и вспомогательное оборудование после наложения тепловой изоляции должны быть окрашены лаком или краской, стойкими против паров и газов, выделяющихся в помещении. Окраску следует производить не реже 1 раза в 2 года.

На рис. 5-13 показана простая изоляция горизонтального секционного теплообменника со съемными крышками на фланцах. Изоляция состоит из одного слоя матрасов из минеральной ваты 1, уложенных непосредственно на корпус аппарата 2 и сшитых в стык. Маты укреплены проволоочными кольцами 3. К выступам аппарата приварены крепежные крючки 4 и скобы 5, к которым крепятся проволоочные кольца и струны 6, удерживающие изоляцию. По металлической сетке 8, уложенной на маты, нанесен слой штукатурки 7, который может быть окрашен или предварительно оклеен тканью.

На рис. 5-14 показана более сложная тепловая изоляция горизонтального трубчатого теплообменника.

Головка аппарата соединена с цилиндрической частью при помощи кольца. При ремонте и чистке аппарата головку снимают и

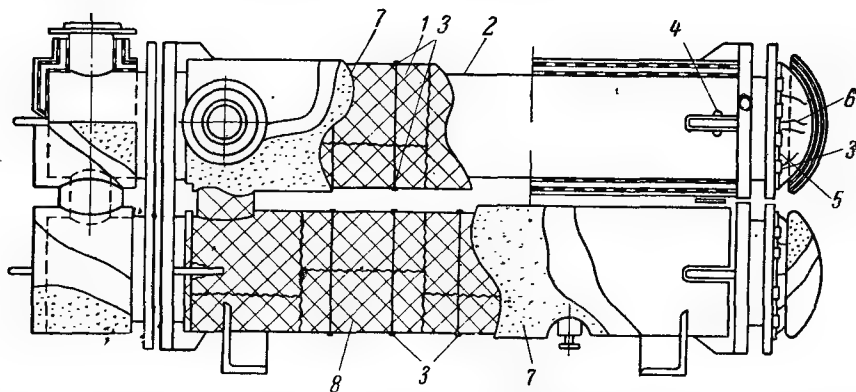


Рис. 5-13. Изоляция горизонтального секционного теплообменника.

1 — минеральные матрасы; 2 — корпус; 3 — проволоочные кольца; 4 — крепежные крючки; 5 — скобы; 6 — струны; 7 — слой штукатурки; 8 — проволоочная сетка.

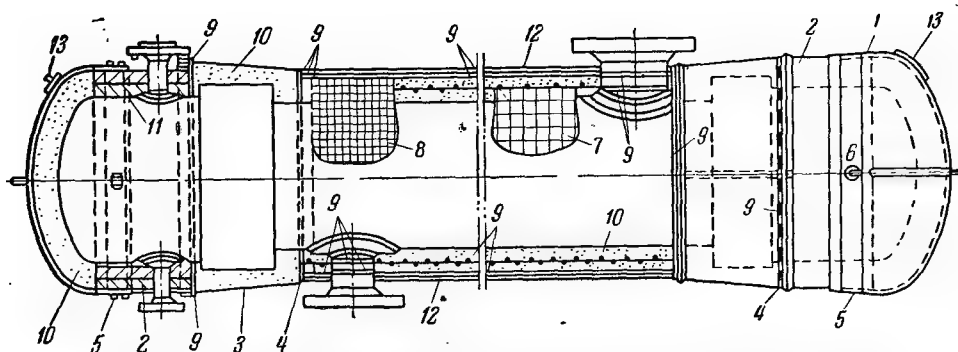


Рис. 5-14. Изоляция горизонтального трубчатого теплообменника.

1, 2, 3—часть составного кожуха; 4—манжет; 5—стяжной пояс; 6—болты; 7, 8—каркас; 9—арматурное кольцо; 10—засыпная изоляция; 11—плиты; 12—слой штукатурки; 13—отверстия для засыпки изоляционного материала.

кладут выпуклой частью на землю. Для предохранения изоляции от быстрого разрушения днище головки изолировано при помощи съемной конструкции, которая может быть выполнена в металлическом кожухе. Разъемный кожух закрепляют на головке путем затяжки поясом из полосовой стали. Цилиндрическая часть головки, на которой затягивается металлический пояс, должна быть прочной, поэтому ее можно выполнить из формованного материала с наружным металлическим кожухом.

Для разъемных соединительных колец требуется также съемная изоляция, которая может быть выполнена в виде засыпной конструкции с разъемным металлическим кожухом, накладываемым внахлестку. В верхней половине кожуха имеется люк для засыпки изоляционной массы.

Цилиндрическая часть аппарата может быть изолирована матами, формованными изделиями и другими материалами.

5-7. РЕГИСТРАЦИЯ И ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЕ АППАРАТОВ И СОСУДОВ.

ПРИЕМКА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТАНОВОК

Сосуды и аппараты, полученные от завода-изготовителя в разобранном виде, после монтажа и регистрации в местной Инспекции Госгортехнадзора должны быть представлены инспектору для освидетельствования — внутреннего осмотра и гидравлического испытания.

Сосуды и аппараты, получаемые от завода-изготовителя в собранном виде, а также смонтированные неполностью, но не доступные к освидетельствованию на месте их установки, из-за наличия внутренних насадок или других устройств, из-за покрытия их стенок изолирующим слоем, футеровкой и т. п., должны перед отправкой с завода-изготовителя подвергаться ин-

спекторскому осмотру и гидравлическому испытанию, о чем инспектором делается запись в шнурованную книгу с указанием срока освидетельствования.

Регистрация таких сосудов и аппаратов, их осмотр и испытания местной Инспекцией Госгортехнадзора после монтажа не производятся, если при транспортировке они не получили повреждений.

Сосуды и аппараты, находящиеся в эксплуатации и подлежащие инспектированию органов Госгортехнадзора, должны периодически подвергаться инспекторским техническим освидетельствованиям в следующем порядке:

1. Наружный осмотр производится не реже 1 раза в год во время работы аппарата без предупреждения администрации предприятия о времени осмотра. Наружным осмотром определяется состояние аппарата, арматуры, предохранительных и измерительных устройств, правильность его обслуживания, уровень знаний обслуживающего персонала.

2. Внутренний осмотр производится не реже 1 раза в 3 года. При этом выявляется состояние внутренних и наружных поверхностей аппарата, или сосуда и его сварных и заклепочных швов, а также действие среды на стенки сосуда.

Если конструкция аппарата не позволяет производить внутренний осмотр, сосуд должен быть подвергнут гидравлическому испытанию.

3. Гидравлическое испытание производится не реже 1 раза в 6 лет с предварительным внутренним осмотром.

Сроки инспекторского освидетельствования могут быть сокращены в зависимости от состояния сосуда. Если сосуд подвергался ремонту с установкой заплат, заменой листов или устранением выпучин либо более года находился в бездействии, то до пуска в работу он должен быть подвергнут досрочному гидравлическому испытанию и внутреннему осмотру.

Сосуды и аппараты, рабочая среда которых представляет опасность для здоровья людей, кроме обычных освидетельствований подвергаются испытанию на герметичность инертным газом, давление которого на 5% превышает рабочее давление. Администрацией предприятия результаты этого испытания заносятся в специальный журнал после каждого вскрытия сосуда, но не реже 1 раза в год.

Теплообменные установки, в которых действие химической среды вызывает изменение состава и ухудшение механических свойств материала стенок, а также установки с сильно коррозионной средой или температурой стенок выше 475° С, должны подвергаться дополнительному освидетельствованиям в соответствии со специальной инструкцией.

Во всех случаях проведения гидравлических испытаний сосуда или аппарата вместе с ними испытываются относящиеся к ним арматура, трубопроводы и вспомогательное оборудование.

Каждой теплообменной установке должен быть присвоен порядковый номер, который должен быть четко обозначен на фронте установки. Вентилаторы, калориферы, электродвигатели и другое вспомогательное оборудование должны иметь номер той установки, с которой они связаны технологическим процессом. При наличии в установке нескольких вентилаторов, электродвигателей и другого вспомогательного оборудования каждый из них должен иметь номер теплообменной установки с добавлением порядковых индексов.

Теплообменные установки, законченные монтажом и прошедшие испытание на прочность и плотность Госгортехнадзором, вводятся в промышленную эксплуатацию после приемки их приемочными комиссиями согласно

действующим инструкциям. Акт, составленный в результате приемки оборудования, должен быть утвержден организацией, назначившей комиссию.

Принимаемые в эксплуатацию тепловые установки должны быть выполнены в соответствии с проектом и отвечать требованиям технической эксплуатации, Правилам Госгортехнадзора, правилам пользования тепловой энергией, а также нормам по технике безопасности и противопожарной технике.

Перед пуском в эксплуатацию теплообменной установки приемочной комиссии должны быть представлены следующие документы:

- 1) утвержденный технический проект установки с расчетами и объяснительной запиской, согласованный с энергоснабжающей организацией в части соответствия проектного решения выданным техническим условиям на присоединение;
- 2) исполнительные чертежи и схемы установки со всеми трубопроводами и нанесенными на них под номерами арматурой и контрольно-измерительными приборами;
- 3) сводная инвентарная опись оборудования установки;
- 4) ведомость имевших место отклонений от утвержденного проекта с пояснением причин этих отклонений;
- 5) паспорт и протоколы испытаний оборудования на заводах-изготовителях (если они производились), осмотров и пробных пусков;
- 6) протоколы гидравлических и тепловых испытаний, проведенных после окончания строительного-монтажных работ на месте установки;
- 7) шнуровые книги (на оборудование и трубопроводы, подлежащие проверке Инспекцией Госгортехнадзора) с записью инспектора о разрешении на ввод в эксплуатацию;
- 8) инструкция по эксплуатации и ремонту оборудования;
- 9) положение о правах и обязанностях для должностных лиц, обслуживающих установку;
- 10) формы технической отчетности и учета.

Полный комплект схем и чертежей тепловых установок хранится в техническом архиве. Оперативные схемы и чертежи установок должны находиться

у начальника цеха и ответственного дежурного.

До сдачи оборудования в эксплуатацию необходимо создать запас эксплуатационных, ремонтных и аварийных материалов и запасных частей, а также подготовить обслуживающий персонал. Перед вводом в промышленную эксплуатацию должны быть произведены:

1) длительное опробование, наладка и освоение установленного оборудования;

2) необходимые тепловые и технологические испытания оборудования для определения надежности, производительности, экономичности и соответ-

ствия работы установки гарантийным и проектным данным;

3) устранения дефектов, эксплуатационных неудобств и недочетов, обнаруженных приемочной комиссией и обслуживающим персоналом;

4) тепловая изоляция и окраска основного оборудования и трубопроводов. Пуск в постоянную эксплуатацию вновь сооруженных теплообменных установок без тепловой изоляции запрещается.

Включение и пуск теплообменных установок в эксплуатацию должны производиться в соответствии с Правилами пользования тепловой энергией.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ, РЕМОНТ И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТАНОВОК

6.1. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТАНОВОК

Техническое руководство эксплуатацией теплообменных установок осуществляется главным энергетиком или главным механиком предприятия, а непосредственное обслуживание оборудования — эксплуатационным персоналом цеха.

Эксплуатация теплообменных установок производится по инструкциям, утвержденным главным инженером предприятия. Инструкции и наглядные схемы обслуживаемого оборудования с его основными производственными характеристиками должны находиться в распоряжении обслуживающего персонала на каждом рабочем месте.

В инструкциях указывают:

а) права, обязанности и ответственность эксплуатационного персонала;

б) порядок обслуживания оборудования при нормальной эксплуатации и во время аварий;

в) порядок осмотра и ремонта оборудования;

г) мероприятия по технической безопасности и противопожарной технике.

Инструкции должны ежегодно пересматриваться с учетом изменений в схемах сетей и оборудования, а так-

же вновь изданных циркуляров, типовых инструкций и других руководящих материалов вышестоящих инстанций. Обязанности по обслуживанию и ремонту оборудования разграничивают между персоналом производственного цеха и работниками отдела главного энергетика (механика) предприятия. В инструкциях указывается перечень лиц, для которых знание данной инструкции и сдача проверочного испытания по ней обязательны.

Обязанности дежурного персонала. К дежурному эксплуатационному персоналу относятся работники промышленного предприятия, обслуживающие посменно теплообменные установки предприятия. Дежурный персонал должен работать по графику, утвержденному начальником цеха. Замена одного дежурного другим, а также дежурство в течение двух смен подряд допускаются только с разрешения начальника цеха. Самовольное оставление дежурным рабочего места запрещается независимо от того, находится оборудование в работе или остановлено. В исключительных случаях оставление дежурным рабочего места допускается только при замене его другим лицом с разрешения начальника участка, смены или цеха.

Дежурный должен принять смену от предыдущего дежурного, а после окончания работы сдать смену следующему по графику дежурному. Уход с дежурства без сдачи смены запрещается.

При приемке смены дежурный обязан:

а) ознакомиться с производственным заданием, ходом технологического процесса, состоянием и режимом работы оборудования, арматуры и приборов на своем участке и произвести личный осмотр их в объеме, установленном должностной инструкцией;

б) выяснить у сдающего смену, какое оборудование находится в резерве или ремонте и за каким оборудованием должно быть установлено особое тщательное наблюдение;

в) проверить чистоту рабочего места (оборудования и помещения);

г) проверить и принять инструмент, материалы, ключи от помещений, журналы и ведомости;

д) прочесть в журналах записи и распоряжения за период после своего последнего дежурства;

е) оформить приемку и сдачу смены записью в журнале или ведомости за подписями принимающего и сдающего смену;

ж) сообщить непосредственному начальнику в смене о вступлении на дежурство и о всех недостатках, замеченных им при приемке смены.

Приемка и сдача смены во время ликвидации аварий, производства операций по пуску и остановке оборудования запрещается, а при неисправном тепловом оборудовании допускается только с разрешения начальника цеха или главного энергетика (механика) предприятия.

Дежурный во время своего дежурства является лицом, ответственным за правильное обслуживание и безаварийную работу всего оборудования на порученном ему участке. Поэтому он должен обеспечивать экономичный и надежный режим работы теплового оборудования в соответствии с утвержденным технологическим режимом, оперативными требованиями и производственной программой.

Каждый дежурный должен в соответствии с указаниями инструкции вести своевременно запись показателей

работы оборудования в ведомостях (журналах), внося в них замеченные особенности, недостатки и ненормальности.

При нарушении режима работы, повреждении или аварии теплового оборудования дежурный обязан немедленно самостоятельно принять меры к восстановлению нормального режима работы оборудования или ликвидации аварийного состояния, используя подчиненный ему персонал, и немедленно сообщить о происшедшем непосредственному начальнику смены. В случае неправильных действий дежурного эксплуатационного персонала представители администрации, ответственные за оборудование, обязаны вмешаться в ликвидацию аварии — вплоть до отстранения дежурного и принятия на себя руководства дальнейшим ходом ликвидации аварии и ответственности за него.

Соблюдение эксплуатационного режима. Для соблюдения правильного эксплуатационного режима теплообменных установок необходимы:

1) исправность и бесперебойность работы оборудования;

2) высокий уровень квалификации обслуживающего персонала;

3) обеспеченность необходимыми видами энергии и рациональное ее расходование;

4) выполнение производственного задания по всем показателям при минимальном расходе сырья и максимальном выходе готового продукта.

1. Для бесперебойной работы оборудования, обеспечивающей выполнение производственной программы, необходимы: достаточный резерв основного и вспомогательного оборудования и соблюдение правил технической эксплуатации; своевременное выполнение планово-предупредительных ремонтов оборудования и наличие запасных частей для быстроизнашивающихся узлов и деталей.

Для обеспечения рациональных условий эксплуатации необходимо механизировать обслуживание и ремонт теплообменных установок, а также обеспечить тепловой контроль и автоматическое регулирование процесса, в частности:

а) пуск и остановку основного и вспомогательного оборудования;

б) поддержание регулируемых параметров постоянными или изменение их по заданному режиму;

в) защиту и блокировку оборудования.

В планах развития народного хозяйства предусматривается комплексная автоматизация большинства энергетических и энерготехнологических процессов с одновременным переводом оборудования с периодической и циклической работы на непрерывную при максимально возможном укрупнении единичной мощности агрегатов.

2. Каждый работник из состава дежурного персонала до назначения его на самостоятельную работу по обслуживанию теплообменных установок или при переводе на другую работу проходит производственное обучение на курсах и на рабочем месте, а затем сдает экзамен по технической программе для данной квалификации. Программа должна содержать правила технической эксплуатации и ремонта оборудования, правила техники безопасности и противопожарной техники, должностные инструкции и положения о правах и обязанностях. После проверки знаний назначаемый на должность дежурного работник должен пройти стаж исполняющего обязанности (дублера) по месту работы под наблюдением и руководством высококвалифицированного работника. Срок дублирования определяется в зависимости от сложности и ответственности обслуживаемого оборудования, но должен быть не менее 2 недель.

В процессе работы эксплуатационный персонал должен повышать свои технические знания и периодически, не реже 1 раз в год, подвергаться проверке знаний квалификационной комиссией. Комиссия составляется: для эксплуатационного рабочего персонала — в составе начальника цеха, инженера по технике безопасности и лица, руководящего производственным обучением; для инженерно-технических работников — в составе главного энергетика или главного механика, начальника цеха, инженера по технике безопасности и лица, непосредственно руководящего производственным обучением; для главных энергетиков и

главных механиков — в составе главного инженера предприятия, представителя энергосистемы или ведомства и технического инспектора ЦК профсоюза.

Результаты технической проверки знаний фиксируются составлением протоколов и выдачей удостоверений работникам о состоявшейся проверке и присвоении им квалификации. Работу по повышению квалификации эксплуатационного персонала должны вести начальники цехов и их заместители, инженеры цехов, начальники смен и мастера. Рекомендуется проведение противоаварийных тренировок на рабочих местах для обучения способом и приемам быстрого предупреждения и ликвидации неполадок и аварий.

Для лиц, допускающих нарушения правил эксплуатации оборудования, инструкций и положений о поддержании заданных технологических режимов, а также правил техники безопасности, производятся внеочередные повторные проверки знаний для определения квалификации и возможности оставления их на занимаемой должности.

3. Надежность энергоснабжения теплообменной установки обеспечивается бесперебойной и безаварийной работой энергоснабжающих агрегатов и предприятий (ТЭЦ, котельной, воздухоподогреватель, кислородной и насосной станций и пр.), а также соблюдением графиков выработки и отпуска потребителям электроэнергии, пара, воды, сжатого воздуха, газа, кислорода и т. д.

Теплообменные аппараты должны работать при оптимальном тепловом режиме, обеспечивающем высокое качество продукции при максимальном производительности и минимальном расходе тепла и других видов энергии. Оптимальный тепловой режим установки должен соответствовать оптимальному технологическому режиму и основываться на передовом производственном опыте и надлежащем теплотехническом контроле. Оптимальный тепловой режим теплообменных агрегатов устанавливается на основании тепловых испытаний.

Расход тепла и других видов энергии должен оцениваться с учетом стои-

мости и доступности энергоносителей, а также с учетом максимального использования отходов производства, выделяемых в виде вторичных энергетических ресурсов (вторичного пара, тепла конденсата, отходящих газов, охлаждающей воды, технологической продукции и т. д.).

4. Рациональная эксплуатация энерготехнологических установок (выпарных станций, ректификационных колонн, реакторов, автоклавов и т. д.) должна обеспечивать экономное расходование сырья и материалов при максимальном выходе готового продукта высокого качества. Технологический режим разрабатывается технологами, однако он должен быть основан на экономичном расходовании энергоносителей нужных параметров и быть согласован с графиками нагрузки и распределения энергии энергоснабжающих предприятий и потребителей.

Теплотехнические испытания установки. Для определения соответствия эксплуатационных показателей установки проектным по потребляемой тепловой энергии, выходу готового продукта, тепловым и материальным потерям, а также выявления показателей, необходимых для планирования и составления калькуляции себестоимости продукции, составления теплового и материального балансов, производят приемочные, а также эксплуатационные теплотехнические (технологические) испытания установки. Такие испытания позволяют анализировать и оценивать работу установки, отдельных агрегатов и цеха, а также разрабатывать на их основе рациональные энерготехнологические режимы, тепловые балансы и схемы энергоснабжения цеха и предприятия.

Перед началом испытания в точках, предусмотренных схемой испытания, устанавливают контрольно-измерительные приборы. Все приборы перед испытанием проверяют. К началу испытания подготавливают и инструктируют обслуживающий и специально привлеченный персонал. Испытание начинают только тогда, когда аппарат или установка работают при установленном режиме.

В процессе испытания производят следующие измерения и наблюдения:

1. Измерение количества и наблюдение за качеством продукта в начальных, конечных, а в некоторых случаях и в промежуточных точках его движения. Для составления материального баланса необходимо отбирать пробы продукта для определения его влажности, концентрации, консистенции, объемного веса и других характеристик.

2. Измерение количества пара, горячей и холодной воды, газа и других энергоносителей. Для капельных жидкостей, кроме диафрагменных приборов и расходомеров, можно пользоваться объемными устройствами в виде мерных баков.

3. Измерение давления греющего и вторичного пара, воздуха газов и др., а также температуры энергоносителей и технологического продукта.

4. Измерение электрических величин для объектов и элементов, входящих в комплекс испытываемого оборудования, потребляющих электроэнергию.

5. Измерение температуры поверхности элементов оборудования выходящих вторичных продуктов, воздуха в помещении и вне его — для определения потерь в окружающую среду и составления теплового баланса.

При технологическом испытании необходимо соблюдать следующие условия, обеспечивающие надежность результатов:

1. Продолжительность наблюдений и измерений устанавливается не меньше одной рабочей смены. Наиболее точные и надежные результаты дают испытания длительностью в течение суток, так как они отражают особенности работы всех смен.

2. Интервал между измерениями и наблюдениями обычно устанавливается равным 10—15 мин (температура, давление, влажность, концентрация и т. д.). Измерения специфических характеристик технологического процесса в некоторых случаях производят чаще.

3. Одновременность наблюдений. Выполнение этого важного условия, особенно при колеблющихся или пульсирующих нагрузках, может быть обеспечено устройством звонковой и световой сигнализации.

4. Дублирование основных наблюдений и измерений, что обеспечи-

вает надежность и точность определения главных показателей. Дублирование достигается установкой одинаковых приборов в разных точках и измерениями, основанными на различных принципах или на взаимном соответствии; например, измерение расхода пара по паромеру и расходу питательной воды.

5. Систематический хронометраж отдельных процессов и операций (пуск и остановка отдельных аппаратов и вспомогательных устройств, чистка, обдувка, резкое изменение нагрузки и др.).

6. Выполнение в процессе испытания упрощенных расчетов для выявления основных результатов по данным наблюдения через 2—4 ч после начала испытания.

При обработке результатов испытания следует исключить сомнительные замеры, которые могут явиться следствием случайных факторов, искажения показаний приборов и других причин, и лишь после этого составлять тепловой и материальный балансы.

Учет, технико-экономические показатели и нормирование расходов энергии. Правильная эксплуатация оборудования обеспечивается путем организации и ведения учета по следующим показателям:

а) расход пара, горячей воды и других энергоносителей по агрегату или установке, цеху и предприятию;

б) количество вторичного пара, возвращаемого конденсата, охлаждающей воды, газов и других вторичных энергетических ресурсов;

в) количество исходных технологических материалов и готового продукта;

г) часовой, сменный, суточный, месячный и годовой расходы энергоносителей и продуктов;

д) удельный расход и величина экономии энергии по нормированным видам продукции, по агрегатам, цехам и предприятию в целом.

Учет основных энерготехнологических показателей дает возможность проверять соблюдение удельных норм расхода энергии на единицу выпускаемой нормированной продукции и принимать меры для их соблюдения. На основании учета расходуемой энергии

и технологического продукта можно определить такие технико-экономические показатели, как величина потерь тепла, конденсата и продукта, выход вторичных энергоресурсов, себестоимость, производительность труда и др.

На предприятиях со среднегодовым потреблением тепловой энергии более 5 млн. ккал/ч необходимо составлять тепловые балансы по цехам и предприятию в целом, которые должен анализировать отдел главного энергетика. Отчетность по цехам и предприятию представляется отделом главного энергетика вышестоящим организациям и местной инспекции энергонадзора по соответствующим формам и в установленные сроки.

Нормирование потребления энергии на предприятии представляет собой одно из важнейших условий правильной эксплуатации оборудования, повышения ее культуры, снижения удельных расходов сырья и экономии энергии.

Величина экономии энергии определяется сопоставлением фактических удельных расходов энергии с установленными нормами вышестоящей организацией или принимаемыми на основании внедрения новой техники, рациональных режимов эксплуатации энерготехнологического оборудования и прогрессивных методов работы обслуживающего персонала.

Под нормой удельного расхода энергии следует понимать расход энергии (или топлива), необходимый для выработки единицы продукции в условиях применения совершенной технологии и выгоднейшего режима работы, полного использования оборудования и организации производства и эксплуатации энергохозяйства в соответствии с достижениями передовой техники.

Нормы расходования энергии, устанавливаемые для отдельных технологических процессов и энергоемких установок, цехов и предприятия, утверждаются вышестоящей организацией одновременно с планами производства на предстоящий хозяйственный год.

В процессе эксплуатации теплопотребляющих систем энергоснабжающая организация в порядке проведения технического надзора контролирует целесообразность использования

потребителем энергоносителей, а также разрабатывает мероприятия, повышающие эффективность энергоиспользования, и следит за выполнением этих мероприятий в установленные сроки.

6.2. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕКОТОРЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТАНОВОК

Установки для подогрева жидкостей

Основная цель включения подогревателей в энергетическую или технологическую систему — достижение требуемого процессом подогрева теплоносителя или технологической среды с минимальными затратами тепла.

В большинстве случаев греющим теплоносителем в подогревателях является водяной пар. Снижение его расхода достигается уменьшением количества подогреваемой среды (например, путем уменьшения балластных примесей, растворителей и т. п.), повышением начальной и снижением конечной температуры подогреваемой среды, снижением температуры конденсата, уменьшением тепловых потерь, повышением коэффициента теплопередачи и другими путями.

Подогреватели жидкости характеризуются следующими показателями:

а) тепловая производительность и соответствующие ей параметры теплоносителей;

б) максимальная температура нагреваемой жидкости для различных параметров первичных теплоносителей;

в) номинальный расход теплоносителей и соответствующие им потери давления;

г) предельное допускаемое давление первичного и вторичного теплоносителей.

Подогревательная установка должна быть оборудована термометрами на паро- и конденсатопроводах, входящих и выходящих трубопроводах греющей и подогреваемой среды каждого подогревателя; манометрами — на трубопроводах первичного и вторичного пара; расходомерами — на трубопроводах первичного и вторичного теплоносителей.

В процессе работы контролируется температура теплоносителей при входе

в аппарат и выходе из него. При паровом обогреве контролируются давление греющего и вторичного пара и степень открытия паровых вентилей. При специальных наблюдениях количество греющего теплоносителя и подогреваемой среды определяют с помощью расходомеров.

На трубопроводах готового продукта и конденсатопроводах от подогревателей предусматривают устройства для отбора проб, по которым определяется качество конденсата или иного продукта. За работой подогревательной установки наблюдают с помощью мерных или смотровых стекол, позволяющих контролировать уровень нагреваемой жидкости, уровень конденсата и равномерность его отвода. По повышению уровня конденсата перед пуском пара и во время работы можно судить о плотности подогревателя. Уровень жидкости в подогревателе может повыситься вследствие неплотности, разрыва трубок, засорения конденсационного горшка или дренажной шайбы, а также вследствие неисправности насоса.

В процессе эксплуатации подогревателей систематически контролируют состояние конденсатоотводчиков, предохранительных клапанов и воздухоотводящих вентилей (размещаемых над уровнем конденсата и выше в нескольких местах по высоте паровой камеры). Чтобы быть уверенным в отводе воздуха и неконденсирующихся газов, воздушный вентиль держат открытым настолько, чтобы температура отводящей трубы была около 50°C ; более низкая температура указывает на то, что воздух не отводится, а более высокая — на выпуск одновременно с воздухом пара.

Работу подогревателей регулируют по температуре или расходу теплоносителей с помощью вентилей, установленного на трубопроводе греющего теплоносителя, или путем изменения количества обогреваемой среды. Для автоматического регулирования работы подогревателей жидкости обычно используют импульс от термоизмерительного прибора, устанавливаемого на выходном трубопроводе, передаваемый на сервомотор, приводящий в движение впускной вентиль или задвижку.

Значительное увеличение разности температур греющего теплоносителя (пара) и выходящей из подогревателя нагреваемой жидкости может быть вызвано загрязнением поверхности нагрева или наличием воздуха в паровом пространстве. Снижение температуры нагреваемой среды может быть вызвано также тем, что часть этой среды проходит через обводную систему подогревателя. Снижение температуры подогрева среды, сопровождаемое снижением давления пара в подогревателе, может происходить вследствие неисправности обратного клапана на линии отбора пара, недостаточного открытия или неисправности задвижки на этой линии.

Для предохранения от эрозии трубы парожидкостных подогревателей должны быть защищены в местах ввода пара в корпус жестко укрепленными паротбойными листами (дефлекторами).

Если в схеме предусмотрено несколько параллельно включенных подогревателей, то распределение жидкости между ними проверяют по температуре ее подогрева в каждом подогревателе и регулируют задвижками, установленными перед подогревателями.

Подогревательная установка должна обслуживаться не менее чем двумя перекачивающими (питательными) насосами, причем их характеристики должны допускать параллельную работу насосов. Общая производительность перекачивающих насосов подогревательной установки должна обеспечивать ее максимальную производительность. Насосы со стороны нагнетания должны быть снабжены запорными задвижками и обратными клапанами.

Для определения изменения конечных параметров теплоносителей (температуры, расхода жидкости, теплопроизводительности) при изменении одного из начальных параметров Е. Я. Соколовым разработана методика расчета и построения тепловых характеристик рекуперативных теплообменных аппаратов. Эта методика позволяет устанавливать зависимость производительности теплообменных аппаратов от изменения различных параметров а также оценивать пока-

затели работы оборудования в изменившихся условиях [Л. 51].

Решая совместно уравнения теплопередачи и теплового баланса поверхностного теплообменника

$$Q = kF\Delta t_{cp} = (Gc)_6 \delta t_m = (Gc)_m \delta t_c \quad (6-1)$$

и подставляя постоянные коэффициенты, найденные путем анализа уравнения средней разности температур между теплоносителями при различных схемах движения, получают уравнение характеристики теплообменного аппарата

$$q = \frac{Q}{\Delta} = \frac{1'}{\frac{a}{(Gc)_6} + \frac{b}{(Gc)_m} + \frac{1}{kF}} \quad (6-2)$$

В уравнениях (6-1) и (6-2) приняты обозначения:

Q — тепловая производительность аппарата, ккал/ч ;

q — тепловая производительность аппарата на один градус максимальной разности температур между греющим и нагреваемым теплоносителями, $\text{ккал/ч}^\circ\text{град}$;

F — поверхность теплообмена аппарата, м^2 ;

$(Gc)_6$ и $(Gc)_m$ — больший и меньший тепловые (водяные) эквиваленты теплоносителей, ккал/град ;

Δt_{cp} — средняя разность температур между теплоносителями, определяемая по формуле

$$\Delta t_{cp} = \Delta - a\delta t_m - b\delta t_c, \quad (6-3)$$

где Δ — максимальная разность температур ($t_1 - t_2$) между греющим и нагреваемым теплоносителями (рис. 6-1, I-IV);

δt_6 и δt_m — больший и меньший перепады температур теплоносителей в процессе теплообмена (рис. 6-1, I-IV);

a и b — постоянные коэффициенты, зависящие от схемы движения теплоносителей в аппарате.

Величины этих коэффициентов приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1

Значения постоянных коэффициентов a и b в формуле (6-2)

Схема движения теплоносителя	Условное изображение процесса на рис. 6-1	Величина коэффициентов	
		a	b
Противоток	I и II	0,35	0,65
Перекрестный ток . . .	V и VI	0,45	0,65
Перекрестный ток . . .	VII	0,45	0,65
Перекрестный ток . . .	VIII и IX	0,55	0,65
Прямоток	III и IV	0,65	0,65

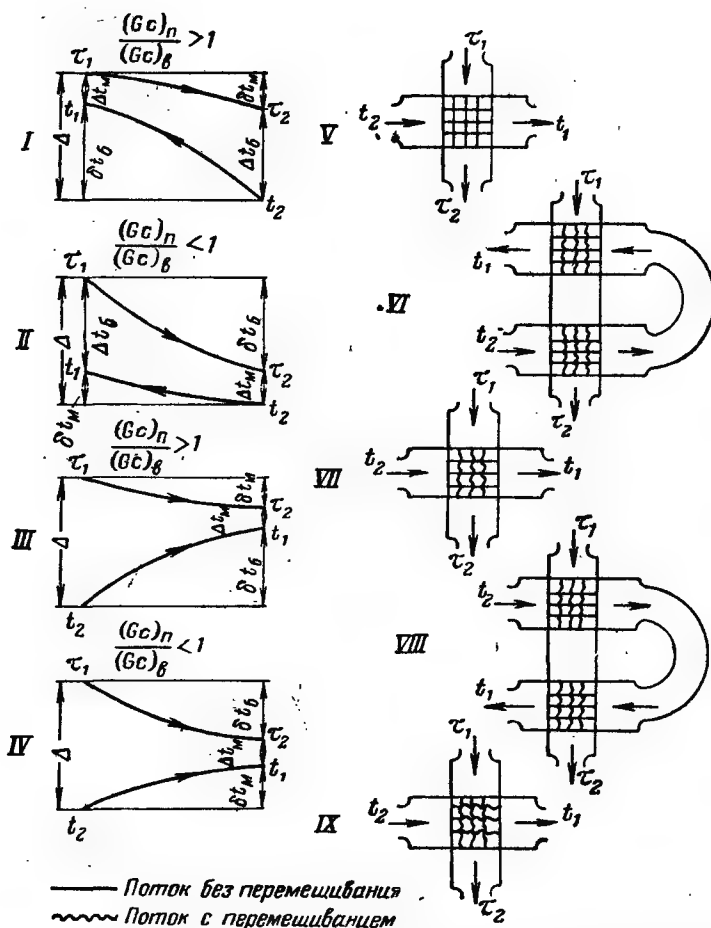


Рис. 6-1. Диаграммы температур и схемы движения теплоносителей в поверхностных теплообменниках.

I и II—противоток; III и IV—прямоток; V—перекрестный ток без перемешивания внутри потоков; VI—сложный ток (при противотоке) с перемешиванием внутри одного потока; VII—перекрестный ток с перемешиванием внутри одного потока; VIII—сложный ток (при прямом токе) с перемешиванием внутри одного потока; IX—перекрестный ток с перемешиванием внутри обоих потоков.

При изменении фазового состояния одного теплоносителя ($adt_m = 0$) формула (6-2) принимает вид:

$$q = \frac{Q}{\Delta} = \frac{1}{\frac{0,65}{Gc} + \frac{1}{kF}}, \quad (6-4)$$

где Gc — тепловой эквивалент неменяющегося теплоносителя.

При изменении фазового состояния обоих теплоносителей ($adt_m = bdt_6 = 0$) формула (6-2) принимает вид:

$$q = \frac{Q}{\Delta} = kF. \quad (6-5)$$

Уравнения (6-3), (6-4) и (6-5) показывают, что тепловая производительность аппарата (Q) пропорциональна максимальной разности температур греющего и нагреваемого теплоносителя (Δ).

По уравнению (6-2) можно определить и построить характеристику теплообменного аппарата, с помощью которой оценивается изменение теплопроизводительности и конечных параметров теплоносителей при изменении расхода одного из них. Для этого задаются значениями тепловых эквивалентов теплоносителей, определяют или принимают по данным испытаний скорости теплоносителей, коэффициенты теплоотдачи и коэффициент теплопередачи и при заданных начальных температурах теплоносителей определяют теплопроизводительность при выбранном режиме.

$$Q = \Delta \frac{1}{\frac{a}{(Gc)_6} + \frac{b}{(Gc)_m} + \frac{1}{kF}}. \quad (6-2')$$

Для аппаратов с изученным теплообменом величина kF может быть заменена выражением в общем виде:

$$kF = \phi_0 G_{II}^{m1} G_B^{m2}, \quad (6-6)$$

где G_{Π} и G_B — расходы первичного и вторичного теплоносителей;

m_1 и m_2 — показатели степени, зависящие от фазового состояния и характера движения теплоносителей;

Φ_0 — постоянный параметр аппарата, зависящий от его конструктивных особенностей и чистоты поверхности нагрева, определяемый опытным или расчетным путем.

По изменению величины Φ_0 можно в условиях эксплуатации следить за состоянием поверхности нагрева.

Уравнение (6-2') после подстановки в уравнение (6-6) принимает вид, которым пользуются обычно при построении характеристики аппарата

$$Q = \Delta \frac{1}{\frac{a}{(Gc)_{\phi}} + \frac{b}{(Gc)_m} + \frac{1}{\Phi_0 G_{\Pi}^{m_1} G_B^{m_2}}} \quad (6-7)$$

Откладывая по оси ординат q , а по оси абсцисс изменение расхода одного из теплоносителей G_B , можно построить семейство кривых соответствующих различным величинам расхода теплоносителя G_{Π} (рис. 6-2). Взяв значение G_B на оси абсцисс и остановившись соответственно на одной из кривых G_{Π} , можно найти на оси ординат искомое значение q . Зная величину Δ по начальным значениям теплоносителей, можно получить общую тепловую производительность аппарата при искомом режиме

$$Q = q \Delta.$$

Для конкретных условий теплообмена величина kF может быть выражена следующим образом:

а) для водоводяных и газогазовых теплообменников при турбулентном движении обоих сред

$$kF = \Phi_0 \sqrt{G_{\Pi} G_B}; \quad (6-8)$$

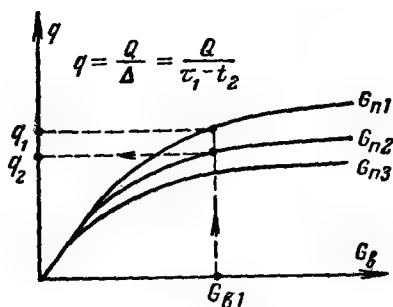


Рис. 6-2. Характеристика теплообменного аппарата.

G_{Π} — расход первичного (греющего) теплоносителя;
 G_B — расход вторичного (нагреваемого) теплоносителя;
 q — тепловая производительность аппарата на 1° максимальной разности температур теплоносителей.

б) для пароводяных и паровоздушных теплообменников, в которых пар конденсируется, а вода или воздух движется при турбулентном режиме,

$$kF = \Phi_0 \sqrt{G_B}; \quad (6-9)$$

в) для воздушных калориферов с водяным обогревом при турбулентном движении теплоносителей

$$kF = \Phi_0 G_{\Pi}^{0.15} G_B^{0.5}. \quad (6-10)$$

Испарители и паропреобразователи

Испарители и паропреобразователи служат для получения требуемого количества вторичного пара (конденсата) заданных параметров при минимальной затрате тепловой энергии.

Различие между испарителем и паропреобразователем заключается в способе использования вторичного пара последней ступени. Испарители применяют для пополнения дистиллятом питательной воды котлов, для получения пресной воды из морской и для других целей. Если вторичный пар испарителя подается в паровую магистраль и используется для теплоснабжения или технологических целей, то испаритель называют паропреобразователем.

В комбинированных испарительно-преобразовательных установках часть вторичного пара конденсируется для питания котлов, а другая часть направляется потребителям.

Для увеличения количества конденсата в испарительных установках вторичный пар предшествующего аппарата используется в качестве греющего пара в последующем аппарате.

Расход первичного пара на выработку 1 т конденсата в одноступенчатом аппарате составляет 1,0—1,2 т; в двухступенчатом 0,6—0,7 т и в трехступенчатом 0,4—0,5 т.

Паропреобразователи выполняются обычно одноступенчатыми, хотя конструктивно и по принципу работы они не отличаются от испарителей. Греющим теплоносителем в испарителях и паропреобразователях служит обычно водяной пар из отборов паровых турбин.

Работа испарительных установок контролируется термометрами, устанавливаемыми после каждого аппарата; манометрами на линиях греющего и вторичного пара и расходомерами, устанавливаемыми на линиях греюще-

го и иногда вторичного пара. При нормальной эксплуатации в испарителях поддерживают уровень испаряемой (кипящей) жидкости, осуществляют продувку, систематически отводят конденсат, удаляют неконденсирующиеся газы, а также следят за чистотой вторичного пара.

Правильный режим питания и продувки испарительных установок имеет целью избежать образования накипи, вспенивания и уноса влаги с паром и попадания воздуха в конденсирующийся пар, обеспечивает работу установки с проектной производительностью.

Для поддержания оптимального режима испарительной установки предусматривают автоматические регуляторы питания, уровня и давления.

Отклонение уровня кипящей жидкости от оптимального оказывает отрицательное влияние на коэффициент теплоотдачи в испарителе. По опытам В. И. Голубинского относительное изменение коэффициента теплоотдачи при кипении в зависимости от уровня жидкости колеблется в пределах от 0,3 до 1 (рис. 6-3).

При оптимальном уровне кипящей жидкости многоступенчатые испарители целесообразно питать путем последовательной подачи жидкости через первый корпус во второй, затем в третий и т. д., с продувкой через последний корпус. При таком питании наибольшая концентрация солей получа-

ется в последнем корпусе, а наименьшая — в первом. При питании многоступенчатой установки в обратном порядке, т. е. через корпус с наименьшим давлением к корпусу с наибольшим давлением, можно получить лучший результат работы установки в связи с концентрацией солей в первом корпусе, где легче обеспечить минимальное напряжение зеркала испарения. Однако для этого между аппаратами нужно ставить перекачивающие насосы.

Для уменьшения уноса влаги стремятся к снижению напряжений зеркала испарения и парового объема. Напряжение зеркала испарения не должно превышать $1\,500\text{--}2\,500\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, а парового объема $1\,500\text{--}2\,500\text{ м}^3/\text{м}^3\cdot\text{ч}$. Уменьшение уноса влаги достигается также повышением качества питательной воды, размывом пены и хорошо организованной продувкой. Продувка испарителей и паропреобразователей регламентируется в зависимости от жесткости питательной воды, величина которой не должна превышать $1\text{--}3^\circ\text{С}$. Периодическая продувка испарителей производится 1 раз в смену. Непрерывную продувку осуществляют с таким расчетом, чтобы не превышать допустимой концентрации солей и щелочности в воде; при этом величина продувки должна находиться в пределах 5—15% (при морской воде до 50%) от общего количества питательной воды. При правильно организованной продувке испарителя улучшается качество дистиллята и уменьшается отложение накипи.

Удаление воздуха из испарителей и паропреобразователей способствует интенсивности теплопередачи. Оно осуществляется постоянной или периодической продувкой воздуха из мест наибольшей его концентрации в паровой камере через паровое пространство во вторичного пара.

Чистотой вторичного пара определяют скорость накипеобразования и интенсивность коррозии в паропотребляющих установках. Поэтому питание испарителей и паропреобразователей необходимо производить деаэрированной водой, а образующийся вторичный пар промывать и сепарировать.

На рис. 6-4,а представлена барботажная промывка пара. По схемам

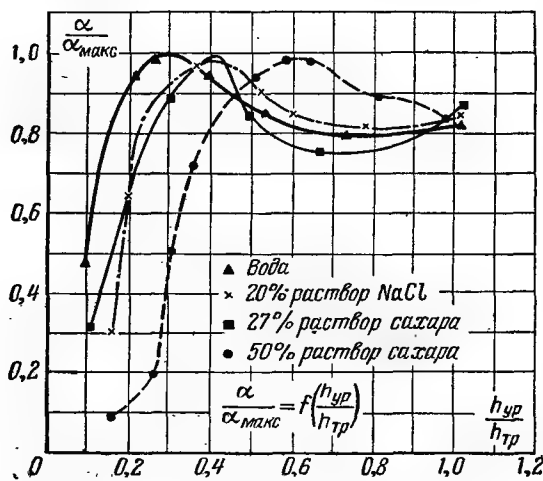


Рис. 6-3. Изменение коэффициента теплоотдачи при кипении в зависимости от уровня кипящей жидкости.

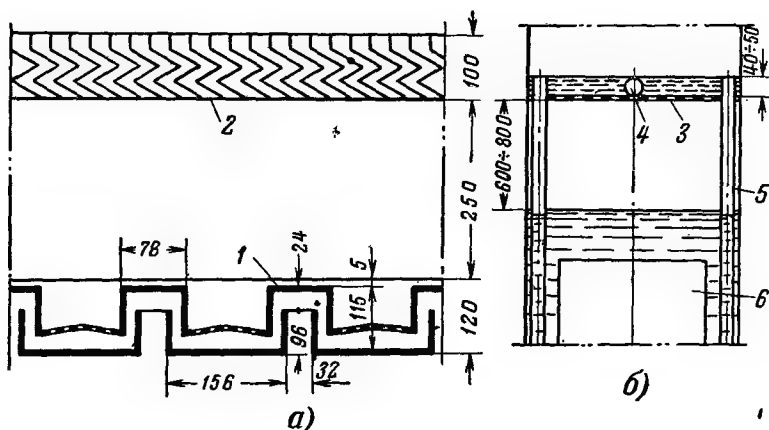


Рис. 6-4. Устройства для барботажной промывки пара в испарителях.

а—устройство ЦКТИ; б—промывочное устройство с дырчатым листом; 1—паропромывочное устройство; 2—пластинчатый сепаратор; 3—промывочный дырчатый лист; 4—трубопровод подвода питательной воды; 5—трубопровод отвода воды в водяной объем; 6—нагревательная камера.

рис. 6-4, а и б пар проходит через слой питательной воды, подаваемой на дырчатый лист. В результате соприкосновения на листе воды и пара внесенные с паром капельки воды с высокой концентрацией солей растворяются в питательной воде с меньшей их концент-

рацией, вследствие чего концентрация солей в паре уменьшается. После промывки пар поступает для отделения влаги в жалюзийный сепаратор (рис. 6-4, а), основанный на смачиваемости металла влагой, или в сепаратор, основанный на ином принципе

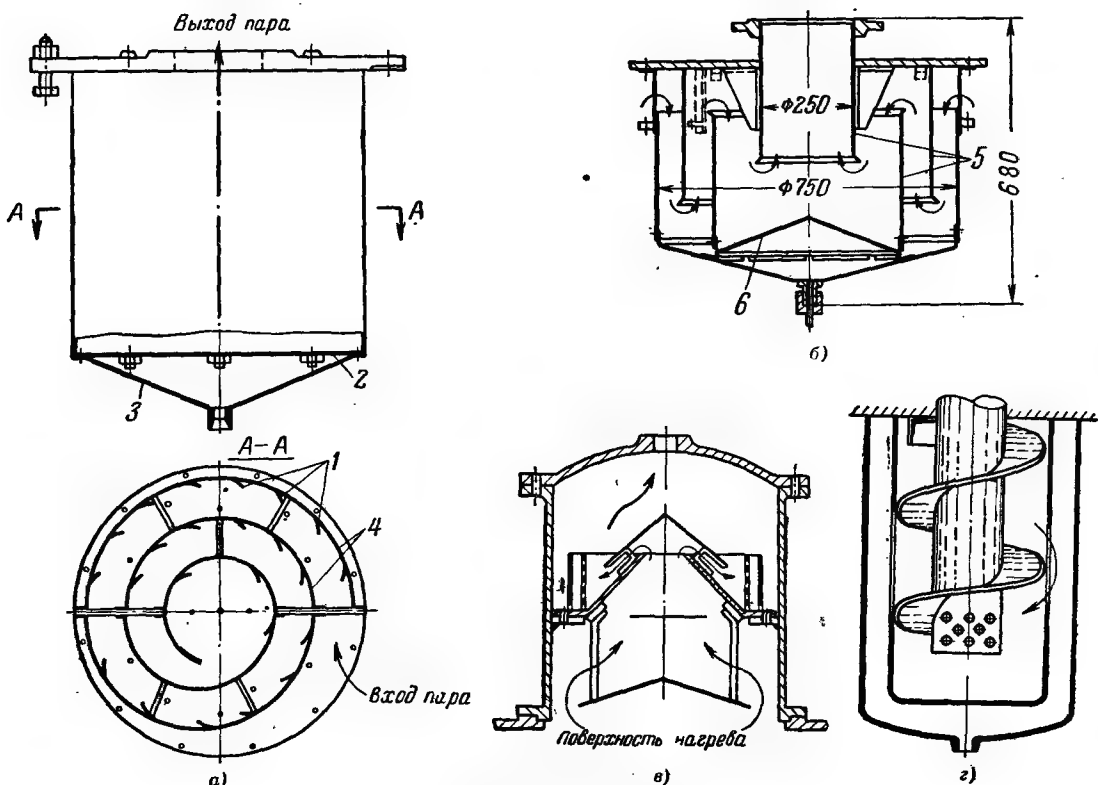


Рис. 6-5. Сепараторы пара.

а—центробежный с плавниками; б—с концентрическими отбойными щитами; в—щелевой; г—центробежный винтовой; 1—плавники; 2—доска с отверстиями; 3—воронка; 4—улитка; 5—цилиндры; 6—отражатель с отверстиями

(действие центробежной силы, крутых поворотов с изменением скоростей и др. (рис. 6-5, а, б, в, г)).

Вертикальные испарители характеризуются лучшей организацией циркуляции жидкости, имеют более высокий коэффициент теплопередачи и меньше подвержены загрязнению поверхности нагрева, чем горизонтальные испарители. Чистка внутренней поверхности прямых труб греющей камеры значительно легче чистки наружной поверхности пучка гнутых труб горизонтального испарителя, кроме того, вертикальные аппараты занимают меньшую площадь.

Выпарные установки

Оптимальный режим выпарной установки обеспечивает получение концентрированного раствора из последней ступени и вторичного пара нужных параметров из промежуточных корпусов в заданном количестве при минимальной затрате тепла. Это достигается соблюдением заданной кратности испарения и отбора в требуемом количестве вторичного пара из отдельных корпусов. Расход острого пара, греющего первый корпус, обычно минимален при максимально возможном отборе необходимого количества вторичного пара из корпусов, находящихся ближе к концу выпарной установки.

Для обеспечения оптимального режима работы выпарной установки необходимо:

1) поддерживать заданное давление греющего пара, подаваемого в первый корпус, с колебаниями не более $\pm 0,1$ ат;

2) поддерживать предусмотренное технологическим процессом распределение температур и давлений по корпусам выпарной установки;

3) поддерживать непрерывный отвод конденсата из греющих камер выпарных аппаратов и путем химического анализа систематически проверять качество конденсата;

4) обеспечить систематическое питание выпарной установки раствором, подогретым до температуры, близкой к температуре кипения;

5) обеспечить нормальный перепуск раствора из одного корпуса

в другой и систематически отводить из последнего корпуса готовый продукт, поддерживая установленный уровень растворов в аппаратах;

6) обеспечить минимальные потери растворов, концентратов и теплоносителей;

7) поддерживать заданное разрежение в выпарных аппаратах, работающих под вакуумом, и в случаях ухудшения вакуума немедленно выявлять причины и устранять их; поддерживать температуру воды, отводимой из барометрического конденсатора в пределах, заданных технологическим режимом;

8) не реже 1 раза в смену удалять через вытяжные трубы воздух и неконденсирующиеся газы из греющих камер;

9) соблюдать график и порядок промывки выпарных аппаратов, а при необходимости производить внеочередные промывки и очистку их от накипи;

10) обеспечить непрерывную работу приборов теплового контроля и автоматического регулирования, а также исправное состояние и безотказную работу арматуры и вспомогательного оборудования выпарной станции.

Выпарные установки оснащают следующими приборами теплового контроля и автоматического регулирования:

а) автоматическими регуляторами давления пара, поступающего в первый корпус;

б) суммирующим (регистрирующим или указывающим) парометром на паропроводе, подающем пар в цех;

в) регистрирующим манометром на паропроводе, подающем пар в цех;

г) манометрами на греющей камере и в паровом пространстве первого корпуса; манометрами и вакуумметрами на греющих камерах и в паровом пространстве последующих корпусов;

д) автоматическими регуляторами уровня раствора;

е) указывающими и сигнализирующими вакуумметрами на трубопроводах от барометрических или поверхностных конденсаторов;

ж) ртутными термометрами или термометрами сопротивления на выпарных аппаратах, подогревателях, ба-

рометрическом или поверхностном конденсаторе;

з) водомером для учета расхода воды, поступающей на установку или в цех;

и) расходомером для учета раствора, поступающего на выпарку.

Для контроля за непрерывным отводом конденсата, а также за его качеством устанавливают смотровые стекла, пробные краны, а также сигнализирующие солемеры и другие приборы. Для наблюдения за уровнем раствора в выпарных аппаратах устанавливают смотровые стекла.

Для подогрева раствора, поступающего в первый корпус, до температуры, близкой к температуре кипения, перед первым корпусом устанавливают подогреватели, обогреваемые конденсатом или соковым паром. Коммуникации подогревателей должны иметь запорные устройства для отключения и обводной трубопровод у каждого подогревателя. Кроме того, они должны иметь линию для возврата подогретого раствора в промежуточный бак в периоды, когда первый корпус не может непрерывно принимать подогретый раствор.

Тепловая схема выпарной установки со ступенчатым обогревом корпусов выпарки вторичным паром и с обогревом раствора теплом конденсата и вторичного пара обеспечивает максимальную экономию в расходовании острого пара на первый корпус. Пар вторичного вскипания конденсата в системе сбора и возврата конденсата также следует использовать для ступенчатого обогрева корпусов выпарки. Если вторичный пар не может быть использован на производстве, желательно устанавливать струйные термокомпрессоры для повторного его использования в выпарной установке.

Общий полезный перепад температур в выпарной установке оказывает большое влияние на ее производительность и определяется давлением и температурой греющего пара в первом корпусе, а также надлежащим вакуумом в последнем корпусе. Параметры греющего пара в свою очередь зависят от работы котельной или парового двигателя, а вакуум — от работы конденсатора и обеспечения его охлаждающей водой.

Выпарная установка непрерывного действия саморегулируется, поэтому температуры в отдельных корпусах устанавливаются соответственно величине поверхности нагрева, количеству выпаренной воды и коэффициенту теплопередачи данного корпуса.

Многокорпусная установка регулируется паровым вентилем, установленным на трубопроводе пара, греющего первый корпус, и промежуточными вентилями на трубопроводах промежуточного продукта между корпусами. Дополнительное регулирование может осуществляться регулированием разрежения в последнем корпусе посредством дроссельного клапана на паровой коммутации к конденсатору или регулированием количества холодной воды, поступающей на конденсатор.

Автоматическое регулирование выпарной станции может осуществляться:

а) в зависимости от плотности выходящего продукта — воздействием на вентиль греющего пара первого корпуса, передаваемым от вентиля, подающего продукт;

б) в зависимости от температуры в других корпусах — перепускными вентилями на паровой коммуникации этих корпусов;

в) автоматическими регуляторами поддержания постоянного уровня в отдельных корпусах.

Особенности обслуживания выпарных установок. Перед началом выпаривания установка подвергается горячей пробе на воде для проверки в горячем состоянии герметичности аппарата, арматуры, трубопроводов, конденсатоотводчиков, приборов теплового контроля и автоматического регулирования для проверки исправности дренажей, конденсатора и воздушных насосов, а также для устранения всех обнаруженных дефектов. Проба выпарной станции на горячей воде продолжается несколько часов. Во время горячей пробы подтягивают болтовые и резьбовые соединения.

Для заполнения корпусов водой последний из них соединяют с конденсатором и пускают вакуум-насоса создают в нем вакуум. Открывая вытяжные трубы, создают равномерный перепад давлений между корпусами, способствующий перетеканию воды само-

теком последовательно из первого корпуса к последнему. Одновременно с этим в паровую камеру первого корпуса подают острый пар; образующийся вторичный пар подают в греющую камеру второго корпуса и т. д. — до конденсатора, куда вместе с поступлением пара из последнего корпуса подается охлаждающая вода.

После устранения дефектов установку в том же порядке заполняют слабым раствором и пускают в работу.

Запрещаются: подача пара в выпарные аппараты, не заполненные водой или рабочими растворами; подача холодной воды или холодных растворов в горячие греющие камеры; резкое повышение температуры, а также резкое повышение или внезапное снятие вакуума.

По мере упаривания раствора его уровень в корпусах опускается ниже нормального. Пополнение корпусов раствором начинают с последнего корпуса, подавая в него раствор из предыдущего. Так пополняются до нормального уровня все аппараты вплоть до первого, куда слабый раствор подается из расходного бака с помощью насоса. Когда в последней ступени раствор достигнет нужной плотности, начинают его выпуск или откачку с одновременным пополнением раствором последовательно каждого корпуса. В дальнейшем процесс ведут так, чтобы подача раствора в первый корпус, перепуск в последующие и выпуск сгущенного раствора из последнего корпуса происходили непрерывно и равномерно.

При установившемся режиме работы выпарной станции необходимо соблюдать следующие условия, способствующие снижению расхода греющего пара и достижению максимальной производительности установок:

1. Слабый раствор должен поступать на выпаривание равномерно, соответствовать заданной концентрации и иметь установленную температуру.

2. В аппаратах должен поддерживаться уровень раствора, обеспечивающий наибольший коэффициент теплоотдачи (рис. 6-3).

3. Посредством регулирования вентилями на трубопроводах греющего и вторичного пара, а также на вытяжных трубах необходимо поддерживать за-

данный перепад температур между корпусами.

4. По расходомерам необходимо следить за установленным по режиму отбором; превышение отборов, особенно в первых корпусах, нарушает распределение тепловой нагрузки между корпусами и температурный режим, что снижает общую производительность установки.

5. Качество сгущенного раствора необходимо выдерживать не ниже заданного.

6. Необходимо контролировать работу конденсатоотводчиков, отвод газов, количество и чистоту вторичного пара, разрежение в последнем корпусе и конденсаторе.

При остановке выпарной станции прекращают подачу слабого раствора в первую ступень выпарки и вместо него начинают подавать воду. Вторичный пар от испаряющейся воды служит греющим паром для упаривания раствора в последующих корпусах. Так постепенно водой наполняют все аппараты и ведут упаривание до тех пор, пока из последнего корпуса не удален весь сгустившийся раствор.

Если остановка произведена для промывки аппаратов, то к воде добавляют соду или соляную кислоту и в течение нескольких часов поддерживают в аппаратах кипение, после чего аппараты опорожняют, промывают чистой водой и проветривают.

При остановке на длительное время все аппараты и трубопроводы освобождают от жидкости для предотвращения разрывов при ее замерзании.

При работе многокорпусной выпарной установки под разрежением разрежение в последнем корпусе осуществляется конденсационным устройством, состоящим из барометрического конденсатора, воздушного насоса и воздушной коммуникации. Нормальная работа этого устройства обеспечивает минимальный расход холодной воды на конденсатор, небольшую затрату электроэнергии на воздушный насос и минимальные потери в коммуникации.

Вода после конденсаторов используется для технологических нужд в зависимости от ее температуры и химического состава.

Реакционные аппараты

Реакционными аппаратами называются закрытые сосуды, предназначенные для проведения химических реакций в твердой, жидкой или газообразной среде, с подводом или отводом тепла по установленному технологическому режиму. Наиболее распространенные из них — автоклавы, конвертеры, конденсаторы, хлораторы, нитраторы, сульфураторы, карбонизаторы.

Оптимальным считают такой энерготехнологический режим, при котором реакционная масса имеет высокое качество и обрабатывается за наименьший период времени при минимальном расходе энергии.

В зависимости от характера производственного процесса реакционные аппараты могут работать периодически и непрерывно. Условия работы реакционных аппаратов разнообразны. В некоторых случаях в начале технологического процесса требуется подвод тепла к реакционной массе, а в конце — отвод тепла от нее [Л. 59].

При пуске реакционного аппарата после длительной остановки перед запуском сырьем его проверяют на герметичность. Для проверки аппаратов, работающих под давлением, применяют воздух или инертный газ давлением 3 ат, которое не должно снижаться при испытаниях в течение 10 мин; для проверки герметичности аппаратов, работающих под разрежением, заданный вакуум поддерживают в течение 10 мин.

Для контроля технологического режима в аппарате устанавливают следующие показывающие и записывающие измерительные приборы:

1) термометры на трубопроводах или камерах греющего и охлаждающего агентов;

2) термометры на входе в аппараты, в аппарате и на выходе из него по пути следования обрабатываемого продукта;

3) на каждом аппарате, работающем под давлением, — по два манометра, из которых один рабочий, а другой контрольный; манометры должны иметь гидрозатворы или сифонные трубки для заливки в них масла, предотвращающего забивание трубки продуктом;

4) при паровом обогреве — автоматический регулятор давления на паропроводе;

5) расходомеры, счетчики или весы — для определения расхода обрабатываемого продукта;

6) вакуумметры, указатели уровня, концентратометры и другие приборы — в зависимости от условий работы аппарата.

На реакционных аппаратах, работающих под давлением, устанавливают предохранительные клапаны, открывающиеся при превышении рабочего давления на 10%. Предохранительные клапаны снабжают отводными трубами, выходящими за пределы помещения. На каждом автоклаве устанавливают не менее двух предохранительных клапанов, один из которых должен быть рычажным. Если предохранительные клапаны установить нельзя, разрешается устанавливать предохранительные пластины, разрывающиеся при превышении давления в аппарате не более чем на 25% рабочего давления.

При подготовке химических аппаратов к пуску особое внимание должно быть уделено герметизации и исправности тракта, по которому движется токсичное сырье или ценные химикаты. Токсичными считаются такие вещества, которые в малых концентрациях (в смеси с воздухом или водой) опасны для жизни человека при соприкосновении с ними в течение короткого времени. Опасными газами и смесями являются окись углерода, сероводород, хлор, окись азота, аммиак, фосген, циан, бром и др. На каждом подводящем трубопроводе должна быть укреплена табличка с наименованием химического вещества, которое по нему транспортируется.

Наполнение аппарата газообразным, жидким или твердым веществом представляет собой ответственную операцию. Способ наполнения должен соответствовать технологическому процессу и инструкции.

Перед наполнением аппарата необходимо убедиться в исправности запорной арматуры, перемешивающих устройств и приспособлений для выпуска готового продукта.

Наполнение газом производится по трубопроводам, соединяющим аппарат

с газгольдером, баллоном или ресивером компрессора.

Жидкости вводят в реакционный аппарат наливом, засасыванием и выдавливанием. Наполнение аппаратов наливом осуществляется обычно из сосуда-мерника, расположенного над аппаратом. Наполнение засасыванием требует создания в аппарате вакуума и применяется в тех случаях, когда жидкость нельзя транспортировать другим способом из-за ее токсичности или взрывоопасности. Выдавливание жидкости в реакционный аппарат из хранилища или промежуточной емкости производится с помощью сжатого воздуха или инертного газа.

Твердые вещества загружаются в аппараты механизированными способами — через бункера с секторными затворами, с помощью питателей, шнеков или элеваторных устройств; вручную — через питательные люки с помощью лопат, контейнеров и мешков. При токсических и горячих материалах ручная загрузка недопустима.

Точность дозировки загружаемых материалов оказывает большое влияние на эксплуатационные показатели процесса, обеспечивая экономию сырья, улучшение качества готового продукта, уменьшение удельного расхода тепла, сокращение времени реакции и устранение брака продукции.

При необходимости охлаждения обрабатываемого продукта непосредственно в аппарате предусматривают устройство, позволяющее охлаждение горячей водой с постепенным понижением ее температуры до заданной технологического режима. Резкое охлаждение стенок аппарата не допускается во избежание образования трещин и разрывов.

Отвод продукта из реакционного аппарата производится сливом или выдавливанием. Вязкие и малоподвижные реакционные продукты удаляются через выпускные устройства в днищах, а легкоподвижные жидкости — выдавливанием с помощью сжатого воздуха или инертного газа, подаваемого при давлении 3 атм. Для того чтобы токсические продукты не проникали в атмосферу помещения, опорожнение аппаратов от таких продуктов и транспортировку их можно производить под вакуумом.

Конденсаторы

Поверхностные и смесительные конденсаторы относятся к распространенному типу теплообменных аппаратов и находят применение как в теплосиловых установках, так и во многих технологических установках в тех случаях, когда необходимо поддерживать процессы испарения или конденсации при заданном вакууме (выпаривание, дистилляция, ректификация и др.).

Поддержание заданного вакуума обеспечивает нормальный технологический процесс установки и работу с максимальной производительностью и минимальным расходом энергоносителей, а также высокое качество продукции.

Для предупреждения «срыва» вакуума в конденсаторе необходимо надежное питание электрическим током электродвигателей циркуляционных насосов, поддержание их в исправном состоянии, сохранение герметичности конденсационной установки.

Постепенное ухудшение вакуума может быть предупреждено при надежном охлаждении воды в водоохлаждающих устройствах, своевременной очистке поверхности охлаждения поверхностных конденсаторов, хорошей герметичности конденсаторной установки и надежной работе воздухоотсасывающей установки.

Плотность конденсаторов определяется несколькими способами.

Оценка воздушной плотности по скорости ухудшения вакуума. Плотность конденсационной установки по скорости ухудшения вакуума определяется по данным, приведенным в табл. 6-2 [Л. 5].

Величина нагрузки конденсатора существенно влияет на скорость ухудшения вакуума в нем, поэтому допустимые значения коэффициента K , оценивающего воздушную плотность конденсатора, следует относить к нагрузкам, близким к номинальной (80—100%).

Для более точной оценки воздушной плотности конденсатора по скорости падения вакуума рекомендуется следующая формула:

Таблица 6-2

Оценка воздушной плотности конденсаторов

Оценка плотности	Скорость ухудшения вакуума ΔH , мм рт. ст./мин	
	для турбин мощностью	
	12 000—25 000 квт (50—100 т пара в час)	25 000 квт и выше (100 т и более пара в час)
Отличная	2—3	До 1
Хорошая	3—5	1—3
Удовлетворительная .	5—8	2—3

$$K = \frac{\Delta H}{\frac{d_k}{F_k} \left(\frac{D_k^{\text{ном}}}{100} + 1 \right)},$$

где K — коэффициент, равный 25, 50 или 90 соответственно отличной, хорошей и удовлетворительной воздушной плотности;

ΔH — скорость падения вакуума, мм рт. ст./мин;

d_k — удельная паровая нагрузка, кг/м²·ч;

F_k — поверхность охлаждения конденсатора (по паровой стороне), м²;

$D_k^{\text{ном}}$ — количество пара, пропускаемого через конденсатор, т/ч.

Оценка воздушной плотности по измерению количества воздуха, проникающего в конденсатор. Метод контроля воздушной плотности конденсационной установки по измерению количества воздуха, проникающего в конденсатор, является наиболее надежным. Для этой цели эжекторы снабжаются иногда измерительными диафрагмами, расположенными на выходе паровоздушной смеси. При таком методе контроля оценка воздушной плотности производится по следующей формуле:

$$K_1 = \frac{G_b}{\frac{D_k^{\text{ном}}}{100} + 1},$$

где K_1 — коэффициент, равный 1,0, 2,0 или 3,5 соответственно отличной, хорошей и удовлетворительной воздушной плотности;

G_b — количество воздуха, удаляемого из конденсатора эжекторами, кг/ч;

$D_k^{\text{ном}}$ — количество пара, пропускаемого через конденсатор, т/ч.

Основной причиной ухудшения вакуума является загрязнение поверхности охлаждения отложениями неорганических солей и органических веществ, растворенных в воде, а также ее механических примесей.

При разомкнутом цикле водоснабжения следует ожидать загрязнения преимущественно органическими веществами и механическими примесями; при оборотном водоснабжении загрязнения бывают преимущественно солевые. Для уменьшения отложения органических загрязнений применяют хлорирование воды. Отложения на стенках в системах оборотного водоснабжения предупреждают продувкой циркуляционной системы, а также фосфатированием, рекарбонацией, катионированием и известкованием воды.

Гидравлическая плотность поверхностных конденсаторов контролируется путем сравнительных химических анализов охлаждающей воды и конденсата, производимых 1 раз в смену. В установках, работающих на морской воде или на воде с плотным остатком более 1 000 мг/л, контроль при помощи солемеров производится непрерывно.

Допустимая величина присоса охлаждающей воды зависит от требований, предъявляемых к питательной воде котлов, качества охлаждающей воды и величины добавки химически очищенной воды и устанавливается в зависимости от местных условий.

В теплосиловых установках величина присоса пресной воды не должна превышать в среднем 0,05% количества конденсируемого пара: максимальная величина присоса, допустимая в течение не более 50 ч, 0,1%. При работе на морской воде присос не должен превышать 0,01% количества конденсируемого пара (в прямоточных котлах величина присоса должна быть не более 0,005%).

Конденсатоотводчики

Конденсатоотводчики устанавливают в тех случаях, когда нужно автоматически удалять конденсат пара при переменном его расходе теплообмен-

ной аппаратурой. Хорошая работа конденсатоотводчиков обеспечивает нормальный производственный процесс. При неплотности внутренних органов конденсатоотводчика потери пара могут достигать 500—1 000 кг/ч. Для устранения потерь тепла через конденсатоотводчики должен быть организован непрерывный контроль их работы.

В качестве конденсатоотводчиков применяют конденсационные горшки-автоматы, подпорные шайбы и дроссельные вентили, а также гидравлические затворы.

Конденсатоотводчики устанавливают в удобном для обслуживания месте и обеспечивают контрольными устройствами. Для правильной эксплуатации конденсатоотводчиков необходимо:

1) горшки поплавкового типа заполнять перед пуском конденсатом и удалять воздух из корпуса горшка;

2) ежедневно проверять состояние внутренних узлов горшка при помощи выведенного наружу рычага или установленных перед горшком и после него контрольных приспособлений;

3) в период прогрева пароприемников и паропроводов держать открытым вентиль пусковой продувки; конденсационный горшок должен включаться только после окончания прогрева, после чего пусковая продувка прекращается.

4) выключать конденсационный горшок, установленный для дренажа главных паропроводов, если имеются броски воды из котла, и открывать обводную линию;

5) во время работы конденсационные горшки следует продувать снизу для удаления твердых осадков, которые могут попасть в клапан и ускорить износ запорного органа; для уменьшения засорения перед конденсатоотводчиком рекомендуется устанавливать сетчатые фильтры;

6) изолировать конденсационные горшки.

Конденсатоотводчики ремонтируют через 1 500—2 000 ч работы. На крупных предприятиях целесообразно иметь постоянно действующий стенд для ремонта и настройки конденсатоотводчиков, проверки их работы после ремонта и снятия характеристик.

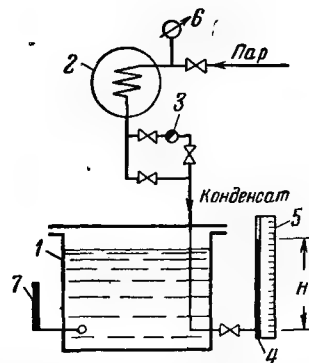


Рис. 6-6. Схема установки для проверки конденсатоотводчиков.

1—контрольный бак; 2—пароприемник; 3—конденсатоотводчик; 4—водомерное стекло; 5—тариговая линейка; 6—манометр; 7—термометр.

Каждый конденсатоотводчик при установке его вновь или после ремонта испытывают при помощи калориметра, состоящего из контрольного бачка с водой, водомерного стекла с таригованной линейкой, манометра и термометра.

Схема установки для проверки конденсационных горшков показана на рис. 6-6. Перед испытанием в контрольный бак 1 заливают холодную воду из водопровода с начальной температурой t_1 и начальным весом G_1 [кг]. Вес воды определяют по таригованной высоте H и начальной температуре t_1 . Во время испытания конденсат из пароприемника поступает через конденсатоотводчик 3 в бак; к концу испытания количество воды в баке равняется G_2 [кг]. Это количество определяют по высоте H'' и конечной температуре t_2 . Поправки на удельный вес воды определяют по таблицам.

Из уравнения теплового баланса калориметра определяют теплосодержание i_w или температуру конденсата t_k :

$$i_w = t_k = \frac{G_1 t_1 - G_2 t_2}{G_2 - G_1} \text{ [ккал/кг]}.$$

Возможны следующие случаи:

1) $t_k > t_{\text{нас}}$ — температура конденсата больше температуры насыщения греющего пара. Это недопустимо, так как указывает на пропуск пара конденсатоотводчиком; следовательно, требуется ремонт горшка или изменение проходного сечения шайбы. Коли-

Неполадки конденсатоотводчиков с открытым поплавком и способы их устранения

Неполадки	Признак	Последствия	Причина	Способ устранения
Пропуск пара	а) Из контрольной трубки за горшком с шумом выходит пар б) Температура конденсата слишком высока	Перерасход пара	а) Открыт обводной вентиль б) Обводной вентиль пропускает в) Клапан горшка разъеден паром г) Течь поплавка д) Грязь в поплавке е) Поплавок слишком тяжел ж) Вследствие наклонной установки шпильки клапана задевает втулку	а) Закрыть обводной вентиль б) Притереть обводной вентиль в) То же г) Заклепать или заварить поплавок д) Вычистить поплавок. е) Убавить груз до необходимого по расчету ж) Поставить горшок по ватерпасу
Горшок заливается конденсатом	а) Из контрольной трубки все время идет конденсат б) Подводящая труба остывает в) Конденсат слишком охлажден г) Аппарат плохо греет	а) Уменьшение производительности аппарата б) Возможны гидравлические удары — —	а) Горшок мал б) Грязь под поплавком не дает ему опускаться в) Мал вес поплавка г) Засорено отверстие клапана	а) Увеличить номер горшка или расточить клапан (если допустимо по давлению) б) Прочистить горшок через пробку в) Увеличить груз на поплавке до необходимого по расчету г) Прочистить отверстие клапана
Горшок не работает	а) Конденсат из горшка не выходит б) Аппарат плохо греет в) Подводящая труба холодная	— — —	а) Горшок включен неверно б) Горшок не рассчитан на повышенное давление в) Грязь под поплавком г) Клапан прикипел	а) Включить горшок согласно стрелке на корпусе б) Проверить вес поплавка по давлению в) Прочистить горшок через пробку в корпусе г) Прочистить клапан

чество пара, пропускаемого конденсатоотводчиком, находится из уравнения

$$x = \frac{i_1 - i_w}{r_1} \cdot 100\%,$$

где i_1 и r_1 — теплосодержание и теплота парообразования греющего пара при давлении в пароприемнике P_1 , атм.

2) $t_k = t_{\text{нас}}$ — это допустимо, если требуется по условиям технологического режима; температуру конденсата можно снизить путем уменьшения диаметра шайбы.

3) $t_k < t_{\text{нас}}$ — нормальное условие, указывающее на отсутствие пропуска пара. При этом необходимо проверить, обеспечивает ли пароприемник необходимые параметры нагреваемого вещества и удовлетворяет ли он технологическому режиму установки. Если эти условия не удовлетворяются, необходимо увеличить диаметр проходного сечения шайбы конденсатоотводчика, не выходя, однако, за пределы $t_k = t_{\text{нас}}$.

Встречающиеся неполадки в работе конденсационных горшков с открытым поплавком и способы их устранения приведены в табл. 6-3 [Л. 61].

6.3. РЕМОНТ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТАНОВОК

Виды и организация ремонтов

Регулярное и качественное проведение ремонтов оборудования обеспечивает выполнение производственных планов и устранение потерь производственной мощности предприятия. Поэтому рациональная организация ремонтов имеет важное значение.

Система планово-предупредительных ремонтов (ППР) включает мероприятия по уходу, надзору и ремонту, которые выполняются в определенные календарные сроки и подразделяются на текущий, средний и капитальный ремонты.

1. Текущий ремонт обеспечивает уход и надзор за оборудованием в рабочем состоянии. Цель ремонта — устранение дефектов оборудования и причин, способствующих их возникновению путем очистки, промывки поверхностей и отдельных узлов аппарата, ремонта отдельных деталей, подтяжки болтовых соединений, регулировки и исправления отдельных повреждений.

Основные операции, выполняемые во время текущего ремонта теплообменной аппаратуры, включают:

1) наружный осмотр аппарата с исправлением внешних дефектов изоляции, заменой болтов и шпилек, подтяжкой болтовых и резьбовых соединений;

2) проверка состояния арматуры и замена или ремонт ее;

3) осмотр и чистка контрольно-измерительной аппаратуры: указателей уровня и водомерных стекол, гильз для термометров, сифонных трубок и кранов для манометров;

4) проверка и очистка конденсаторов и труб для удаления продукта;

5) осмотр внутренних поверхностей аппарата через смотровые окна и люки с помощью переносной лампы;

6) осмотр приводных механизмов и двигателей, а также перекачивающих насосов, вентиляторов, эжекторов и других элементов вспомогательного оборудования.

Текущий ремонт обычно производится во время перерывов в работе и в выходные дни, однако при непрерыв-

ном режиме работы текущий ремонт должен производиться при остановленном оборудовании. Текущий ремонт выполняют ремонтные бригады под руководством механика цеха, энергетика или мастера.

2. Средний ремонт предусматривает ремонт отдельных узлов и замену изношенных деталей. Основные операции, выполняемые при среднем ремонте, следующие:

1) производство работ, предусматриваемых текущим ремонтом к моменту производства среднего;

2) замена арматуры с проверкой предохранительных клапанов на гидравлическом прессе;

3) проверка герметичности трубчатки или паровой рубашки и устранение неплотностей подвальцовкой, заваркой или заглушением отдельных труб;

4) ревизия разъемных резьбовых и фланцевых соединений;

5) разборка и ремонт вспомогательного оборудования с заменой отдельных узлов и деталей;

6) ремонт футеровки и антикоррозионных покрытий;

7) ремонт изоляции и окраска поверхностей аппарата.

Для выполнения средних ремонтов, кроме ремонтной бригады цеха, привлекаются специализированные бригады, включающие квалифицированных сварщиков, изоляторов, футеровщиков, слесарей-наладчиков и др. Производство среднего ремонта требует остановки оборудования.

3. Капитальный ремонт имеет целью восстановление оборудования по возможности до начального технического состояния. При капитальном ремонте производится полная разборка аппарата со снятием его с фундамента и ремонтом отдельных деталей и узлов на месте, в ремонтных цехах или предприятиях.

Капитальный ремонт производится по разработанному плану и обеспечивается необходимыми документами и материалами (дефектными ведомостями, чертежами, запасными частями, инструментами, приспособлениями, подъемно-транспортным и такелажным оборудованием), а также рабочей силой и ремонтной площадкой.

При капитальном ремонте выполняются следующие операции:

1) ознакомление с чертежами и дефектной ведомостью установки; подготовка необходимых деталей, инструментов, материалов и людьемо-транспортных приспособлений;

2) получение разрешения на отключение оборудования, подлежащего ремонту;

3) снятие контрольно-измерительных приборов, вскрытие аппарата, разборка его на узлы и детали;

4) промывка и очистка деталей;

5) отбраковка деталей методом осмотра и измерений, уточнение дефектной ведомости на ремонт и ведомости на запасные части;

6) ремонт деталей, сборка узлов, подгонка деталей и узлов;

7) сборка аппарата, включающая проверку и регулирование механизмов аппарата, опробование аппарата и устранение выявленных дефектов;

8) изготовление деталей и узлов, внесение усовершенствований, намеченных к реализации в период капитального ремонта;

9) проверка аппарата после сборки и регулирования, подготовка аппарата к испытанию в рабочем состоянии; опробование на холостом ходу;

10) испытание аппарата по техническим условиям и сдача его в эксплуатацию, с проведением испытания аппарата на герметичность, нагревом аппарата, залитого водой, а также испытанием всех движущихся механизмов в течение одной рабочей смены;

11) завершение выполненного капитального ремонта актом о передаче оборудования в эксплуатацию.

Текущий и средний ремонты финансируются за счет оборотных средств предприятия, а капитальный ремонт за счет амортизационных отчислений.

Кроме планово-предупредительных бывают ремонты аварийные и восстановительные. Аварийный ремонт вызывается повреждением деталей агрегата. В зависимости от степени повреждения оборудования аварийный ремонт может носить характер текущего, среднего или капитального ремонта. Восстановительный ремонт заключается в ремонте изношенного оборудования, дальнейшая эксплуатация которого нецелесообраз-

на и выполняется за счет специально выделенных средств.

Ремонт теплообменного оборудования может производиться индивидуальным методом, при котором все детали и узлы агрегата ремонтирует, как правило, одна бригада, производя ремонтные работы в пределах ремонтных мастерских технологического цеха. При агрегатном методе ремонта неисправные узлы и детали аппарата заменяют отремонтированными или новыми узлами и деталями. При агрегатном методе сокращается время ремонта, работы по ремонту могут быть полнее специализированы, повышается производительность труда.

Для проведения различных видов ремонта вырабатывают нормы времени непрерывной работы и простоев теплообменной аппаратуры и вспомогательного оборудования. Перед началом ремонтных работ составляют календарный график ремонта основного и вспомогательного оборудования, содержащий сроки и последовательность выполнения ремонтных работ по каждому узлу или аппарату. Графики ремонта теплообменных установок согласовывают с графиками ремонта соответствующего производственного оборудования энергоснабжающей организации.

Календарный график ремонта утверждается главным энергетиком, главным механиком или главным инженером предприятия.

Одновременно с текущим и капитальным ремонтом теплообменных установок производится ремонт относящегося к ним вспомогательного оборудования.

Во время ремонта в случае необходимости снимают эскизы для пополнения альбома чертежей запасных частей оборудования и выполняют недостающие схемы тепловодов. Для успешного и быстрого проведения ремонта ведут систематический учет наличия запасных частей и запасного оборудования, запас которых должен пополняться по мере расходования при ремонтах.

Организацию ремонта и контроль за его проведением осуществляет начальник цеха. Приемку теплового оборудования из капитального ремонта производит главный энергетик (меха-

ник) предприятия при участии начальника и механика соответствующего цеха, а также мастера, ответственного за проведение ремонтных работ. Приемку из текущего ремонта производят начальник и механик соответствующего цеха и лица, ответственные за ремонт и эксплуатацию установки.

Работы, выполняемые при капитальном ремонте основного теплового оборудования, принимаются по актам.

Изменения, выявленные и произведенные во время ремонта, вносятся в паспорта, схемы и чертежи оборудования.

Некоторые ремонтные работы, устранение неполадок и аварий

Очистка поверхностей нагрева в теплообменниках. При загрязненных, коррозионно-активных или дающих отложения теплоносителях имеет место загрязнение поверхности нагрева, что делает необходимой периодическую очистку теплообменников. Продолжительность работы аппарата между очистками зависит от скорости загрязнения поверхности нагрева и допускаемой степени загрязненности и устанавливается опытным путем. Она может составлять от нескольких суток до нескольких месяцев.

В зависимости от структуры загрязняющего слоя и степени загрязненности, а также в зависимости от типа аппарата для очистки металлических поверхностей нагрева применяют механический, гидромеханический или химический метод. Для удаления твердой накипи с поверхности труб часто применяют термический метод очистки¹.

При мягких осадках и твердой накипи применяют механическую очистку, производимую шарошками, щетками, металлическими прутьями, бойками, резиновыми шариками, цилиндрами и другими инструментами (рис. 6-7). Во многих случаях применяют пневматические шарошки и бойки. Очистку труб снаружи производят вручную. При наружной очистке труб кожухотрубных теплообменников с выходящей трубочкой аппарат разбирают. Очистка при большом числе труб и малом шаге затруднительна.

Львовский технологический институт разработал ультразвуковой метод очистки накипи в теплообменных аппаратах и котлах.

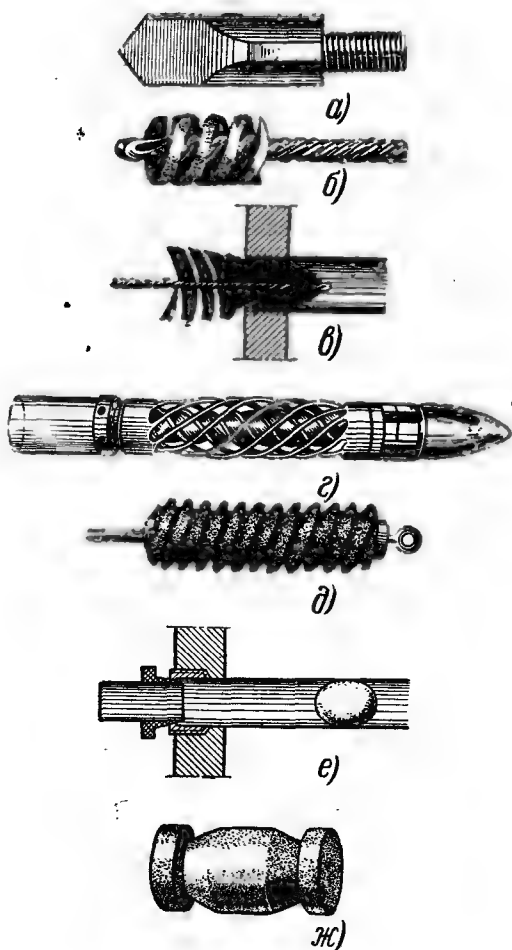


Рис. 6-7. Приспособления для механической очистки труб.

а — шарошка; б, в — волосяные щетки; г — металлический ерш; д — проволоочный ерш; е — резиновый шарик; ж — резиновый цилиндр.

Гидравлическую очистку применяют для удаления из труб и с других поверхностей аппарата неприлипающих мелких осадков (песка, растений, щепы и т. п.). В некоторых случаях очистку труб производят продувкой водяным паром или сжатым воздухом.

Перечисленные методы очистки связаны с разборкой теплообменника и большой затратой труда.

Несколько лет назад в ГДР была применена очистка труб конденсаторов во время работы турбогенератора при помощи резиновых шариков.

Диаметр шариков из губчатой резины на 1 мм больше внутреннего диаметра трубы. Шарики большего диаметра (на 2 мм больше диаметра трубы) применяют в тех случаях, когда допускаемый перепад давлений в трубе превышает 2 м вод. ст. Удельный вес материала шариков принимают немного, больше единицы, с таким расчетом, чтобы при определенной скорости воды в трубах и камерах конденсатора шарики находились во взвешенном состоянии.

В конденсатор шарики вводят так, чтобы было обеспечено равномерное распределение их по трубам. Гидродинамика потока предотвращает попадание нескольких шариков в одну трубу; сопротивление, создаваемое попавшим в трубу шариком, уменьшает скорость входа в нее воды, и поэтому следующий шарик увлекается в соседнюю свободную трубу. Перед пуском в работу устройства для очистки труб шариками внутреннюю поверхность труб тщательно очищают.

Устройство для очистки внутренней поверхности труб теплообменников с помощью резиновых шариков представляет собой замкнутый водяной контур, состоящий из теплообменника, сетки для улавливания шариков, ловушки для шариков, насоса, распределителя и соединительных труб (рис. 6-8). Постоянная циркуляция шариков в водяном контуре поддерживается при помощи циркуляционного насоса 3, забирающего воду через ловушку 2 из сетки 1 и подающего ее во входной патрубок теплообменника. Шарики проходят через трубную систему аппарата, снимают накопившийся на внутренней поверхности труб осадок, уносятся вместе с охлаждающей водой в патрубок и попадают затем в сетку для их улавливания. Сетка, изготовленная из нержавеющей стали в виде воронки, складывающейся специальным приводом, встроена в вертикальный сбросной водовод на пути потока воды, направленного сверху вниз. Между сеткой и насосом установлена ловушка с ситом 2, которая наружным приводом может быть повернута так, что циркулирующие в системе шарики улавливаются и при необходимости удаляются из системы. Через ловушку закладывают также новые шарики.

Если теплообменник имеет два входных патрубка для охлаждающей воды, то за насосом устанавливается распределитель 4. Через смотровое окно можно находить правильное положение перегородки в распределителе и контролировать циркуляцию шариков в системе. Циркуляционный насос имеет достаточно большие сечения проточной части, благодаря чему шарики проходят через него без повреждения.

Расход шариков во время опытов составлял около 35 шт. на 1 мет мощности турбины в год, количество воды, проходившей через циркуляционный насос, 0,4% от общего расхода охлаждающей воды. Напор насоса для подачи шариков был равен 10—15 мм вод. ст. Устройство для очистки труб

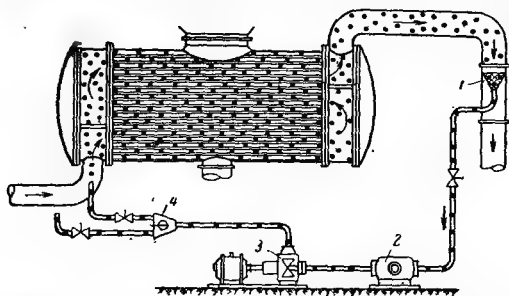


Рис. 6-8. Устройство для очистки труб конденсаторов резиновыми шариками.

1—сетка для улавливания шариков; 2—ловушка для шариков; 3—насос; 4—распределитель.

включалось в работу ежедневно на 4—6 ч.

При пародках нет необходимости производить очистку труб шариками, так как вода содержит песок, предотвращающий загрязнение труб. В такие периоды необходимо, своевременно улавливать все шарики при помощи ловушки и ставить улавливающую сетку в положение для промывки. Чистка труб при помощи шариков не требует дополнительных расходов на обслуживание, так как работу выполняет дежурный персонал основного оборудования.

В случаях, когда межтрубное пространство, а иногда и трубы, недоступны для очистки указанными выше способами, применяют химическую очистку. В качестве реактивов для химической очистки поверхностей теплообмена применяют растворы соляной кислоты, едкого натра и хлорной извести, а также газообразный хлор (табл. 6-4).

При термической очистке, применяемой при очень твердой накипи, теплообменник опараживают и все трубы обогревают паром, затем пар выключают и трубы орошают холодной водой, быстро вводимой в межтрубное пространство через питательный патрубок или по продолженным в верхней части корпуса трубам диаметром 38—50 мм с отверстиями. Вследствие резкого изменения температуры труб накипь от них отскакивает, смывается водой и удаляется через люк. Термическую очистку не следует применять при неудовлетворительной компенсации температурных удлинений труб, так как из-за резких изменений температуры последние могут деформироваться, а также может нарушиться герметичность их крепления.

Кроме периодической очистки необходимо при проектировании и эксплуатации оборудования предусматривать профилактические мероприятия, уменьшающие загрязнение. На образование накипи со стороны горячей жидкости (при конденсации пара, упаривании раствора и т. п.) влияют следующие основные факторы: степень чистоты греющего пара, вид и качество выпариваемой жидкости, весовое напряжение поверхности нагрева, напряжение зеркала испарения и парового объема, скорость циркуляции, конфигурация поверхности нагрева. Для предотвращения образования отложений необходимы высокое качество предварительной очистки конденсирующегося пара или выпариваемой жидкости, поддержание оптимальных нагрузок и напряжений поверхности нагрева, правильная организация циркуляции раствора и т. д.

В теплообменных аппаратах, в которых циркуляционная вода используется для конденсации или охлаждения среды, в качестве профилактических

Способы периодической очистки труб теплообменных аппаратов

Метод очистки	Характер загрязнений	Способ очистки
Механический	Мягкие осадки	Шомполами, проволочными щетками из латунной проволоки; проталкивание струей воды или сжатым воздухом (под давлением 3—10 ат) резиновых шариков или пробок (ершей)
	Очень твердая накипь	Шарошками, жесткими проволочными щетками; долотами с приводом от гибкого вращающегося вала с последующей промывкой водой. Комбинирование механического способа очистки с химическим
Химический	Углекислые соли известкового характера, отлагающиеся в результате исходной жесткости воды	3—5%-ным раствором соляной кислоты
	Слизь маслянистого, илистого или глинистого характера	3—5%-ным раствором едкого натра с добавкой керосина
	Загрязнения органического характера	Раствором хлорной извести с содержанием активного хлора 15—20 г/м ³ или газообразным хлором
Гидравлический	Мелкий песок	Промывка циркуляционной водой с повышенной скоростью или струей воды под давлением 10—12 атм
	Листва, щепа и т. д. на входных концах труб (загрязнение трубных досок)	Промывка потоком воды
Термический	Очень твердая накипь	Прогрев трубок паром с последующим опрыскиванием холодной водой

мер против загрязнений рекомендуются: продувка систем оборотного водоснабжения; рекарбонизация циркуляционной воды дымовыми газами; обработка циркуляционной воды кислотой; фосфатирование циркуляционной воды; катионирование и известкование циркуляционной воды.

1. Для предохранения конденсаторов от органических загрязнений применяют хлорирование охлаждающей воды путем обработки ее хлорной известью. Режим хлорирования и дозировку хлора устанавливают опытным путем для каждого отдельного случая на основе определения способности воды поглощать хлор, характера и интенсивности отложений, температурного режима.

2. Расстройство вальцовки

и ее устранение. Причинами расстройства вальцовки могут явиться: плохое качество развальцовки и небрежная приемка после монтажа или ремонта; неудовлетворительная компенсация температурных удлинений трубок, недостаточная толщина и плохое анкерное крепление трубных досок, приводящие к большим прогибам их в работе; хрупкость материала трубок; коробление трубной доски из-за большой разности температур в отдельных ее участках.

Расстройство вальцовки легко обнаруживается при контроле качества обрабатываемого материала, конденсата или газа. В таких случаях требуется остановка оборудования.

Улучшение компенсации и устранение прогиба трубных досок достигается

ются путем изменения отдельных узлов аппарата; хрупкость трубок, обусловленная наклепом, устраняется отжигом.

3. Разрывы труб и их предупреждение. Разрывы труб могут быть вызваны их вибрацией, коррозией, эрозией, гидравлическими ударами или чрезмерными внутренними напряжениями в материале труб.

В случае разрушения труб и смещения обменивающихся теплом сред аппарат немедленно отключают, прекращая вначале подачу теплоносителя с более высоким давлением, а потом теплоносителя с более низким давлением. После остановки и опорожнения аппарата находят разорванные трубы и выясняют причину их повреждения.

Вибрация труб приводит к их истиранию и разрушению при неправильной установке поддерживающих перегородок, а также при наличии больших зазоров между трубами и стенками перегородок. Для устранения вибрации допускается расклинивание трубок деревянными рейками. Чтобы увеличить поверхность трения труб аппарата о перегородки, в отверстия перегородок иногда ставят отрезки труб большего диаметра длиной 40—60 мм.

Коррозия труб происходит обычно вследствие химической агрессивности воды или плохого удаления воздуха из парового пространства, особенно из нижней части и «мертвых» углов, образуемых перегородками в паровом пространстве. Удаление из воды кислорода, устранение подсосов воздуха в систему и систематическая ее продувка могут несколько снизить вредное влияние агрессивной среды. Для устранения электрической коррозии в аппарате устанавливают дополнительные электроды.

Эрозия труб (разрушение струей пара) происходит обычно в участке поступления пара. Для защиты труб от эрозии против паровпускного отверстия устанавливают отбойный стальной лист — дефлектор.

Гидравлические удары в аппаратах могут иметь место при неисправности регуляторов питания, наличии воздушных пробок в питательном трубопроводе и в подогревателях, резких переключениях задвижек в коммуникациях

питательной системы и в случае местного парообразования при слабой циркуляции жидкости в трубах. Устранение гидравлических ударов достигается правильной эксплуатацией оборудования (особенно при пуске и изменении режима), поддержанием в исправности регуляторов питания, регулярной продувкой системы и устранением лишних гидравлических сопротивлений при входе жидкости.

Внутренние напряжения в материале труб бывают обычно следствием неправильной термической обработки их на заводе. Глубокие продольные риски и канавки на поверхностях труб также могут служить причиной их разрушения, особенно при работе в агрессивных средах.

Для обнаружения места расстроя вальцовки и труб с течью в пучке при ремонте аппарата производят опрессовку вынутаго из корпуса пучка водой или создают в пучке разрежение и передвигают пламя свечи вдоль труб и по трубной доске. Разрежение может быть создано путем присоединения к эжектору, вакуумному насосу или конденсатору.

При вскрытии аппарата для ремонта следует также производить наружный осмотр трубчатой системы, трубных досок, каркаса, перегородок, арматуры, приборов теплового контроля и автоматического регулирования.

При обнаружении в процессе эксплуатации труб с течью их выключают, заглушив медными пробками с небольшой конусностью. При наличии более 10% заглушенных труб их необходимо заменить новыми.

Поврежденные прямые трубы удаляют путем смятия их в местах развальцовки и извлечения со стороны водяной камеры. Для удаления поврежденных гнутых труб разбирают каркас вынутаго из корпуса пучка, сдвигают перегородки в одну сторону, распирают и отгибают деревянными брусками мешающие трубы и отрезают изогнутую часть лопнувшей трубы. После этого с помощью специальной точеной оправки выбивают прямые концы поврежденной трубы в сторону водяной камеры. Выбивать их в сторону пучка значительно труднее, так как они обычно развальцованы в доске под конус.

4. Пробивание прокладок во фланцах аппаратов и трубопроводов и их устранение. Причины образования неплотностей, свищей и раковин во фланцевых соединениях — неудовлетворительное качество прокладок, перекосы фланцев, неравномерная затяжка болтов, резкие колебания температуры или давления среды. Ремонт заключается в замене прокладки, устранении перекоса фланцев или ликвидации язвин на поверхности фланца. Небольшое повреждение уплотнительных поверхностей (до 1 мм) можно устранить проточкой поверхности фланца. При сильном повреждении перед проточкой производят наварку уплотняющих поверхностей.

5. Повреждения или разрывы сварных стыков и их исправление. Основные причины повреждения сварных стыков — недоброкачественная сварка, перекос корпуса аппарата из-за плохого качества монтажа или усадки фундамента, проседание опор трубопроводов, плохая компенсация и др. В зависимости от характера и степени повреждения и качества стыка место повреждения частично или полностью переваривают.

6. Течь в сальниках задвижек и компенсаторов и их устранение. Причиной возникновения течи обычно бывает плохая набивка, низкое качество набивочного материала и износ уплотнительных поверхностей. Для устранения течи подтягивают сальник, а если это не помогает, локализуют поврежденный участок. При остановке оборудования сменяют набивку сальника или износившиеся детали уплотнения.

При авариях теплового оборудования, подведомственного Инспекции Госгортехнадзора, администрация предприятия обязана немедленно уведомить местную инспекцию. По правилам Госгортехнадзора до прибытия инспектора администрация предприятия обязана сохранить обстановку, при которой произошла авария, если это не представляет опасности для жизни и здоровья людей и не нарушает порядка работы предприятия. Каждая авария должна быть расследована согласно инструкции по расследованию и учету аварий и несчастных случаев,

разработанной Главной инспекцией Госгортехнадзора. При расследовании аварии должны быть установлены: причины возникновения и развития аварии; виновник возникновения и развития аварии; правильность действия персонала; дефекты и характер повреждений оборудования.

Кроме того, должны быть разработаны мероприятия для предотвращения подобных аварий.

Противоаварийные мероприятия утверждаются директором или главным инженером предприятия. Классификация аварий определяется в соответствии с действующей инструкцией.

6-4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ЕЕ ОРГАНИЗАЦИЯ

Для того чтобы аппараты, работающие под давлением, не представляли опасности для обслуживающего персонала, находящегося вблизи оборудования и помещений, где аппараты установлены, должны осуществляться меры, обеспечивающие безопасность эксплуатации.

В соответствии с «Правилами устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением», утвержденными Госгортехнадзором СССР, теплообменные установки с рабочим давлением более 0,7 атм должны быть зарегистрированы в местной инспекции Госгортехнадзора. На них должны быть заведены шнуровые книги, в которые заносятся результаты испытания и освидетельствования аппаратов, а также изменения, которым они подвергаются.

Обслуживающий персонал обязан знать и выполнять инструкции и правила технической эксплуатации и техники безопасности и немедленно сообщать о всех замеченных им ненормальностях в работе основного и вспомогательного оборудования, а также о нарушениях правил техники безопасности.

Директора, главные инженеры, главные энергетики (механики) предприятий, начальники цехов, участков, мастерских и лабораторий обязаны обеспечить: проведение организационных и технических мероприятий для создания безопасных условий труда; инструктаж и обучение персонала безопасным методам работы и контроль

за выполнением правил и инструкций по технике безопасности.

На участках, где это требуется по условиям работы, следует вывешивать плакаты по технике безопасности и предупредительные надписи «Не включать, работают люди» и т. п.

Ответственность за несчастные случаи и профессиональные отравления, происшедшие на производстве, несут лица административно-технического персонала, не обеспечившие соблюдения правил техники безопасности и промышленной санитарии и не принявшие мер для предотвращения несчастных случаев и случаев профессионального отравления.

Каждый несчастный случай должен быть тщательно расследован, причем должны быть установлены причины его возникновения и приняты меры по предотвращению подобных случаев в дальнейшем.

Для оказания первой помощи при несчастном случае на участке, в цехе, на ремонтной или монтажной площадке должна быть аптечка с набором медикаментов и перевязочных средств. На предприятиях и крупных ремонтных и монтажных участках организуют постоянные или временные медицинские пункты.

Правила безопасности при эксплуатации. Все работники цеха должны быть ознакомлены с характером опасности данного цеха, знать инструкции по рабочему месту и по технике безопасности и строго их соблюдать. Инструктаж проводится не реже 1 раза в 3 мес., а его результаты регистрируются.

Необходимо поддерживать в цехе чистоту, свободу проходов и исправность средств защиты. Кроме того, в наличии всегда должны быть средства и медикаменты для оказания первой помощи. В случае работы с токсическими материалами на рабочих местах должны быть краны с водой для смывания этих материалов.

На видном месте в производственных помещениях вывешивают инструкции по обслуживанию оборудования и технике безопасности.

В цехах с вредными материалами персонал допускается к работе только в спецодежде и с необходимыми защитными средствами (рукавицы, очки,

противогазы, резиновые сапоги или галоши и т. п.).

Категорически запрещается превышать в аппаратах и трубопроводах давление и температуру, предусмотренные инструкцией по эксплуатации и паспортом на аппарат или трубопровод.

Аппаратура и трубопроводы должны быть герметичны и исправны.

Движущиеся механизмы должны иметь ограждения. Смазка движущихся механизмов и набивка сальников на ходу запрещаются.

В случае протекания по трубопроводам токсических веществ на фланцевых соединениях ставят защитные чехлы, предохраняющие обслуживающий персонал и оборудование от попадания этих веществ при повреждении прокладок.

Включение электродвигателей производят в резиновых перчатках и резиновой обуви или с резиновым ковриком под ногами. Местное освещение и переносные лампы подключают к электросети с напряжением не более 36 в.

Правила безопасности при ремонтных работах. Ремонтные работы внутри сосудов и аппаратов производятся только по письменному разрешению начальника цеха или смены, выдаваемому лицу, ответственному за производство ремонта. В разрешении указывается готовность оборудования к ремонту и меры безопасности, необходимые при производстве работ по ремонту аппарата.

Перед началом ремонта лицо, ответственное за его производство, знакомится с объемом, содержанием и условиями производства работ, обращая особое внимание на готовность аппаратов к ремонту (тщательность очистки и промывки, отключение электрического напряжения и приводов, отключение от действующих коммуникаций). Особенно тщательно должен быть подготовлен ремонт реакционных аппаратов с ядовитыми, горючими и взрывоопасными жидкостями и газами.

Все складки и щели на поверхности аппарата (особенно футерованного) просматривают, очищают его и нейтрализуют остатки вредной среды.

Работы по ремонту теплообменных аппаратов начинают только после их

остывания или искусственного охлаждения до температуры не выше 30° С. Ремонтные работы внутри аппарата с применением открытого огня (паяльные, сварочные и им подобные) производят только по письменному разрешению главного инженера или пожарной охраны предприятия.

Ремонтные работы внутри аппаратов производятся бригадой в составе двух или более человек, один из которых участвует в работах в качестве наблюдателя и находится вне аппарата со всем необходимым для оказания помощи работающему. Рабочие со слабым здоровьем к работе внутри аппаратов для химически вредных веществ не допускаются.

Ремонтные рабочие должны получать инструктаж по специфике ремонтных работ и мерам безопасности, обеспечиваться спецодеждой и обувью, а также защитными приспособлениями (очками, шлемами, противогазами — фильтрующим или с активной подачей воздуха, предохранительным поясом с лямками и веревкой и т. п.). При работе на высоте более 3 м и при невозможности соорудить леса рабочий обязан надеть предохранительный пояс с веревкой, надежно привязанной к опоре.

Инструмент, крепежный материал и другие мелкие предметы должны переноситься и храниться на высоте в специальных ящиках или сумках.

Во время ремонтных работ должны соблюдаться меры предосторожности при подъеме и опускании тяжелых деталей и предметов. Запрещается нагромождение деталей и посторонних предметов у места работ или в самом аппарате.

Пробивка отверстий в перекрытиях, крепление на них такелажных устройств и нагружение перекрытий деталями и предметами для ремонта разрешаются только по указанию технического персонала по строительству. При производстве работ внутри аппаратов разрешается пользоваться электроосвещением и электроинструментами с напряжением только до 12 в, при этом пользуются резиновыми перчатками и резиновыми ковриками.

Запрещается работать электроинструментом, если: корпус инструмента находится под напряжением; неисправен или оголен шнур; не имеется заземляющего провода.

Запрещается становиться на ограждения, трубопроводы, кожухи муфт, подшипники, а также конструкции и перекрытия, не имеющие специальных ограждений и не предназначенные для прохода по ним. Воспрещается перемещаться по мокрым, обледенелым или скользким переходам и конструкциям.

Для затяжки болтов нельзя применять ключи, зев которых больше размеров болта или гайки.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ, И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Материал	Вид полуфабрикатов	ГОСТ	Область применения
Ст. 0	Листы и сортовой прокат	380-60	Для неответственных деталей и изделий, не подверженных значительным растягивающим напряжениям. Например, для шайб, небольших баков под налив, неответственных фланцев, перегородок, отбойников и пр. После пробы на свариваемость допускаются для изготовления прямоугольных резервуаров погруженных конденсаторов — холодильников нефтяной промышленности, для опор небольших вертикальных аппаратов и т. п.
Ст. 1 Технически чистое желе- зо марки А	Листы и сортовой прокат	380-60	Уплотнительные прокладки фланцевых соединений, гребешки лабиринтных уплотнений насосов и турбин, работающих при высоких температурах и давлениях
10 Ст. 2	Листы То же	1050-60 380-60	Для днищ с длинными горловинами или высокими бортами; для частей, сильно деформируемых при изготовлении в холодном состоянии
МСт. 1 кп 15 20 15К 20К Ст. 3	Листы и сортовой прокат То же " " " " " " " "	380-60 1050-60 1050-60 5520-50 5520-50 380-60	Для ректификационных камер, эвапораторов, ректификационных колонн, корпусов теплообменников и других сосудов, работающих под давлением. Применяется также для изготовления приварных фланцев
10 20	Трубы То же	1050-60	Трубы для поверхностей нагрева различного назначения
Ст. 4	Листы и сортовой прокат	380-60	Малонагруженный крепеж, детали насосов, компрессоров, трубные решетки теплообменных аппаратов жесткой конструкции
25 30 35 Ст. 5	Листы и сортовой прокат То же " " " "	1050-60 1050-60 1050-60 380-60	Штатунные болты, валы насосов, запорные элементы арматуры, работающие при температуре до 300° С в коррозионно-неактивной среде. Для решеток теплообменных аппаратов с плавающей головкой
40 Ст. 6	Сортовой прокат То же	1050-60 380-60	Штифты, упорные винты, зубчатые колеса, шпонки

Материал	Вид полуфабрикатов	ГОСТ	Область применения
45 50 65Г Ст. 7	Листы и сортовой прокат То же Лента и сортовой прокат	1050-60 1050-60 1050-60 380-60	Пружины и кулачковые шайбы, работающие в коррозионно-неактивной среде при температуре до 200° С
12МХ 15ХМ	Трубы	ЧМТУ 2579—54	Трубопроводы и трубы поверхностей нагрева, работающие до 540° С. Хорошо свариваются, среда коррозионно-неактивная
12Х1МФ 15Х1М1Ф	Трубы	ЧМТУ 2579—54	Трубопроводы и трубы поверхностей нагрева, до 580° С. Среда коррозионно-неактивная
38ХА 40Х	Прутки, листы, трубы, сортовой прокат	4543-61	Болты и шпильки для рабочей температуры от —40 до +435° С в неагрессивной среде. Гайки от —40 до +480° С
30ХМ 30ХМА	Прутки, проволока, сортовой прокат	4543-61	Болты и шпильки для рабочей температуры от —40 до +480° С в неагрессивной среде. Гайки от —40 до 510° С
25Х2МФА	Прутки, сортовой прокат	4543-61	Болты и шпильки для рабочей температуры от —40 до +530° С в неагрессивной среде. Гайки от —40 до +550° С
25Х2М1Ф1А	Прутки	ЧМТУ 5664-56	Крепежные детали, предназначенные для длительной службы при температуре до 550° С в неагрессивной среде. Плоские пружины лабиринтных уплотнений
Х5М Х5ВФ	Трубы, листы	5632-61	Корпуса и трубы в коррозионно-активной среде
1Х18Н9Т	Листы, трубы, сортовой прокат	5632-51 ЧМТУ 2884-51 ЧМТУ 2885-51	Для изготовления деталей сварной аппаратуры, предназначенной для работы при высоких температурах, например, регенераторов и реакторов каталитических крекингов. Хорошо работает с коррозионно-активными средами в области низких температур. Плохо переносит соляную кислоту. Может быть использована для малонагруженного крепежа
1Х13 2Х13	Листы, сортовой прокат То же	5632-61	Крепеж для внутренних устройств аппаратуры при агрессивных горячих средах
3Х13 4Х13	Прутки, лента, проволока, листы	5632-61	Пружины, предназначенные для службы при высокой температуре в коррозионно-активных средах. Детали шарикоподшипников. Сталь применяется после закалки и низкого отпуска со шлифованной и полированной поверхностью
1Х17М2	Листы	5632-61	Высокопрочная сталь с удовлетворительной свариваемостью. Применяется для теплообменников химической промышленности, работающих в среде азотной и органических кислот

Материал	Вид полуфабрикатов	ГОСТ	Область применения
9Х18	Прутки	5632-61	Шарикоподшипники высокой твердости для нефтяного оборудования, втулки и другие детали, подвергающиеся сильному износу и действию азотной и органических кислот (исключая уксусную, муравьиную, молочную и щавелевую)
Х17	Листы	5632-61	Оборудование азотнокислотных заводов (абсорбционные башни, теплообменники для горячих нитрозных газов и горячей азотной кислоты, трубопроводы и пр.); оборудование заводов пищевой промышленности. Сталь для изготовления сварных конструкций не рекомендуется из-за низкой пластичности и ударной вязкости околошовной зоны
ОХ17Т	Листы	5632-61	Заменитель стали 1Х18Н9Т для изготовления сварных конструкций, не подвергающихся действию ударных нагрузок и при температурах эксплуатации не ниже -20°C . Повышенная сопротивляемость межкристаллитной коррозии
Х25Т	Листы, трубы	5632-61	Сварная аппаратура для растворов гипохлорита натрия, дымящейся азотной и фосфорной кислоты различных концентраций. Трубы пиролизных установок. Температура эксплуатации не ниже -20°C
Х17Н13М2Т Х17Н13М3Т ОХ17Н16М3Т	Листы, сортовой прокат, трубы	5632-61	Аппаратура, подвергающаяся воздействию кипящей фосфорной, муравьиной, молочной, уксусной кислот и других сред повышенной агрессивности. Последняя применяется для колонн снотеза мочевины
Х23Н18	Листы, трубы	5632-61	Детали установок химической и нефтяной промышленности, газопровода, камеры сгорания при рабочей температуре стенки до 1050°C . Трубы для пиролиза метана
Х20Н14С2	Листы, сортовой прокат, трубы	5632-61	Печные конвейеры, ящики для цементации (устойчива в науглероживающих средах)
Х25Н16Г7АР	Листы, лента, сортовой прокат	5632-61	Детали газопроводных систем. Рекомендуется для замены жаростойких сплавов на никелевой основе при рабочей температуре металла до 1100°C
1Х25Н25ТР	Листы толщиной до 3 мм	5632-61	Детали газовых систем, камеры сгорания при рабочей температуре металла до 1100°C . Заменитель сплавов на никелевой основе
4Х14Н14В2М	Полосы, прутки	5632-61	Болты, гайки, шпильки для работы при температуре до 600°C
ХН25ВМТ	Прутки	5632-61	Крепежные детали, работающие при температуре до $650-700^{\circ}\text{C}$
ХН70ВМ10Т	Прутки	5632-61	Крепежные детали, работающие при температуре до $700-750^{\circ}\text{C}$

Материал	Вид полуфабрикатов	ГОСТ	Область применения
ХН7010	Листы, сортовой прокат	5632-61	Может применяться для электрических нагревательных элементов сопротивления
Х28	Листы, сортовой прокат, трубы	5632-61	Хорошо работает в качестве подвесок труб в среде горячих сернистых газов. Трубы пиролизных установок. Быстро охрупчивается
Х25Н20С1	Листы, трубы	5632-61	Хорошо работает до 1150° С в среде топочных газов, содержащих небольшое количество сернистых соединений. Трубы пиролизных установок
ЭИ496 и сталь 20	Биметаллические листы	—	Для изготовления корпусов нефтеаппаратуры из двухслойного листа. Предназначается для работы с горячими сернистыми нефтями
20ХМФЛ 16Х1М1ФЛ	Литье	МВН 632-58	Корпуса насосов и арматуры, фасонные отливки, предназначенные работать при температурах до 570° С в неагрессивных средах
Х11Л	Литье	Заводские технические условия	Фасонные отливки, работающие с неагрессивными средами при температуре до 600° С. При работе в агрессивных средах допустимая температура металла ниже
1Х18Н9ТЛ	Литье	2176-57	Отливки различного назначения, работающие в тех же условиях, что и прокат из стали 1Х18Н9Т при температуре до 600° С
Х25Н13Т	Литье	—	Литые детали, предназначенные для работы при высокой температуре в окислительных средах и газах с малым и средним содержанием сернистых газов. Максимальная рабочая температура стенки в нагруженном состоянии 650° С
ЛА1 ЛА4 ЛА5	Литье	ПМТУ 36-54	Фасонное литье, предназначенное для длительной работы при температуре от 650 до 700° С
АД1	Прутки, листы, ленты, трубы	4784-49	Алюминиевые детали слабо нагруженные и требующие высокой пластичности, теплопроводности или коррозионной стойкости. Высокая коррозионная стойкость в условиях атмосферы и пресной воды; концентрированная азотная кислота не реагирует с алюминием, серная разъедает слабо. Легко растворяется соляной кислотой и щелочами
АК4 АК4-1	Поковки, пресованные прутки, штамповки	4784-49	Поковки и штамповки, предназначенные для работы с азотной кислотой высокой концентрации при температурах вплоть до кипения. Может работать со слабоагрессивными средами при температурах до 400° С
С1 С2 С3 С4	Листы, трубы, проволока, фольга	3778-56	Свинцовые шайбы, прокладки и футеровка устройств, соприкасающихся с серной кислотой при концентрации до 90%, сернистой, фосфорной и плавиковой кислотами при 20°. В щелочах менее стоек, чем железо

Материал	Вид полуфабрикатов	ГОСТ	Область применения
BTI-1 BTI-2	Листы, прутки	AMTY 434-58 AMTY 363-56	Титановые корпуса теплообменных аппаратов химической промышленности. Коррозионная стойкость подобна стали 1X18H9T, а в некоторых средах еще выше, например в растворах азотной кислоты
НП-2 НП-3 НП-4	Листы	6235-52	Облицовка техническим никелем аппаратов, работающих с горячими щелочами при температуре выше 300 °С
MH70-30	Трубы	492-52	Цельнотянутые мельхиоровые трубы конденсаторов и охладителей, работающих на морской воде в условиях, когда применение латунных труб исключено
MHЦ15-20	Полосы, ленты, проволока	492-52	Нейзильбер. Применяется в виде ленты для деталей уплотнений. Обладает высокой коррозионной стойкостью
НМЖМц 28-2,5-1,5	Листы, прутки, проволока	492-52	Монель-металл. Устойчив против коррозии на воздухе, в морской и пресной воде, в щелочах (кроме едкого кали и натра при высоких температурах) в органических кислотах, в нейтральных, щелочных и слабокислых солях, в растворах серной, соляной, плавиковой, угольной и фосфорной кислот
ЛО70-1	Листы, трубы	1019-47	Трубки конденсаторов, холодильников, рыболоверов и теплообменных установок, перерабатывающих засоленную нефть или охлаждаемых морской водой. Трубные решетки
Л62	Листы, трубы	1019-47	Трубы конденсаторов, работающих на пресной воде с неагрессивными средами
M2, M3	Листы, трубы	859-41	Трубы теплообменных аппаратов, корпуса, трубки для присоединения приборов
БрОФ 10-1	Литье	AMTY 211-51	Вкладыши подшипников, венцы червячных редукторов и т. п.
БрАМц 9-2 БрАЖ 9-4 БрКМц 3-1 БрАЖН 11-6-6	Литье " " "	— — — —	Детали, работающие в слабых растворах серной кислоты, сернистого алюминия, органических кислот и растворов солей

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов Г. В., Основы учения о коррозии и защите металлов, Металлургиздат, 1946.
2. Антуфьев В. М. и Ламм Ю. А., Теплообменные аппараты новой конструкции для газотурбинных установок, вып. 8, Машгиз, 1956.
3. Бакланов Н. А., Химическое оборудование из винипласта, Госхимиздат, 1956.
4. Барбанель Р. и Стоклицкий Л., «Холодильная техника» 1958, № 4.
5. Берман С. С., Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок, Машгиз, 1959.
6. Булгаков К. В., Энергоснабжение промышленных предприятий, Госэнергоиздат, 1957.
7. Бюллетень иностранной технической информации, 1960.
8. Вихман Ю. А., Бабицкий И. Ф., Расчет и конструирование нефтезаводской аппаратуры, Гостоптехиздат, 1953.
9. ВСНТО, Сборник № 5, «Углеродистые материалы и их применение в аппаратостроении», Профиздат, 1958.

10. Вторая Международная конференция по мирному использованию атомной энергии (доклады советских ученых), «Ядерное горючее и ядерные материалы», 1959.

11. Гарбар М. И., Пластические массы в народном хозяйстве, Госхимиздат, 1957.

12. Геминнов В. Н., Инструкция по проведению испытаний металла на длительную прочность, ИМЕТ АН СССР, 1960.

13. Даллин А. М., Сбор и возврат конденсата, Госэнергоиздат, 1949.

14. Девес К., Справочник по сталям и методам их испытаний, Металлургиздат, 1958.

15. Домашнев А. Д., Конструирование и расчет химических аппаратов, Машгиз, 1961.

16. Жилияев А. В., Техника безопасности при эксплуатации котлов, трубопроводов и сосудов, работающих под давлением, Профиздат, 1958.

17. Зайдель В. А., Монтаж котельного оборудования, Госэнергоиздат, 1958.

18. Защита химического оборудования от коррозии. Сборник НИИТЭХИМ, 1960.

19. Инструкция по газовой сварке труб малых диаметров из углеродистых и низколегированных сталей, Оргэнергострой, 1958.

20. Инструкция по электродуговой сварке труб из углеродистых и низколегированных сталей, Оргэнергострой, 1959.

21. Инструкция по электродуговой сварке труб из сталей аустенитного класса, Оргэнергострой, 1958.

22. Инструкция по эксплуатации тепловых сетей, Госэнергоиздат, 1958.

23. Каменецкий С. П., Теплоизоляционные работы, Гостройиздат, 1956.

24. Кичигин М. А., Вопросы рационализации теплового хозяйства промышленных предприятий, Гостехиздат УССР, 1953.

25. Кичигин М. А. и Костенко Г. Н., Теплообменные аппараты и выпарные установки, Госэнергоиздат, 1955.

26. Клинов И. Я., Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы, Машгиз, 1960.

27. Кожухотрубные теплообменники общего назначения, Каталог, Информиздат, 1958.

28. Копьев С. Ф., Вспомогательное оборудование машинных цехов электростанций, Госэнергоиздат, 1954.

29. Ларичев В. А., Качественные стали для современных котельных установок, Госэнергоиздат, 1951.

30. Лебедев П. Д. и Щукин А. А., Промышленная теплотехника, Госэнергоиздат, 1956.

31. Линберман Л. Я. и Пейсис М. И., Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении, Машгиз, 1958.

32. Ложкин А. Н., Трансформаторы тепла, Машгиз, 1948.

33. Медовар Б. И., Электродуговая сварка аустенитных сталей, Машгиз, 1958.

34. Николоаев В. Б. и Удыма П. Г., Новое оборудование для заводов химической промышленности, Машгиз, 1960.

35. Нормалы в химическом машиностроении, т. I и II, под ред. Махнева Т. А., Госхимиздат, 1950.

36. Одинок И. А. и др., Теория ползучести и длительной прочности металлов, Металлургиздат, 1959.

37. Поляков К. А., Неметаллические химически стойкие материалы, Госхимиздат, 1952.

38. Правила устройства и безопасной эксплуатации шаровых котлов, Углетехиздат, 1957.

39. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, Углетехиздат, 1957.

40. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды, Углетехиздат, 1957.

41. Правила технической эксплуатации теплоиспользующих установок и тепловых сетей промышленных предприятий. МЭС СССР, Госэнергоиздат, 1954.

42. Преображенский В. П., Теплотехнические измерения и приборы, Госэнергоиздат, 1953.

43. Рамм В. М., Теплообменные аппараты, Госхимиздат, 1948.

44. Рыбасенко И. Д. и др., Технология изготовления химической аппаратуры из нержавеющей стали, Машгиз, 1958.

45. Ряполов А. С., Изготовление и монтаж аппаратуры из нержавеющей стали, Гостройиздат, 1958.

46. Сагалаев Г. В., Антегмит и его применение, Госхимиздат, 1959.

47. Сборник правил и руководящих материалов по котлонадзору. Коммухозиздат, 1955.

48. Смирнов В. К. и Кацнельсон С. Х., Химически стойкие замазки и лаки холодного отверждения, Госхимиздат, 1957.

49. Смирнов В. К. и Вовшина Е. С., Пропитанный графит и его применение в химической промышленности, Госхимиздат, 1959.

50. Смирнов Л. А. и Кантакузен А. В., Химическая аппаратура из кислотоупорной керамики, Госхимиздат, 1957.

51. Соколов Е. Я., Тепловые характеристики теплообменных аппаратов, «Теплоэнергетика», 1958, № 5.

52. Справочник по котлонадзору, Госэнергоиздат, 1954.

53. Справочник по котлонадзору, Техэкономиздат, 1956.

54. Теплотехнический справочник, Госэнергоиздат, 1958.

55. Томашов Н. Д., Теория коррозии и защиты металлов, Академиздат, 1960.

56. Троянский Е. А., Металлы котлостроения и расчет прочности котлов, Госэнергоиздат, 1956.

57. Уваров В. В., Шиурков М. Е. и др., Производство основных элементов котлоагрегатов, Машгиз, 1956.

58. Углеграфитовые теплообменники, их применение в аппаратостроении, Сборник № 5 под ред. И. Я. Клинова, Профиздат, 1958.

59. Удыма П. Г., Реакционные аппараты амьлокрасочной промышленности, Машгиз 1959.

60. Хижняков С. В., Практические расчеты тепловой изоляции, Госэнергоиздат, 1959.

61. Якадин А. И., Конденсационное хозяйство промышленных предприятий, Госэнергоиздат, 1960.